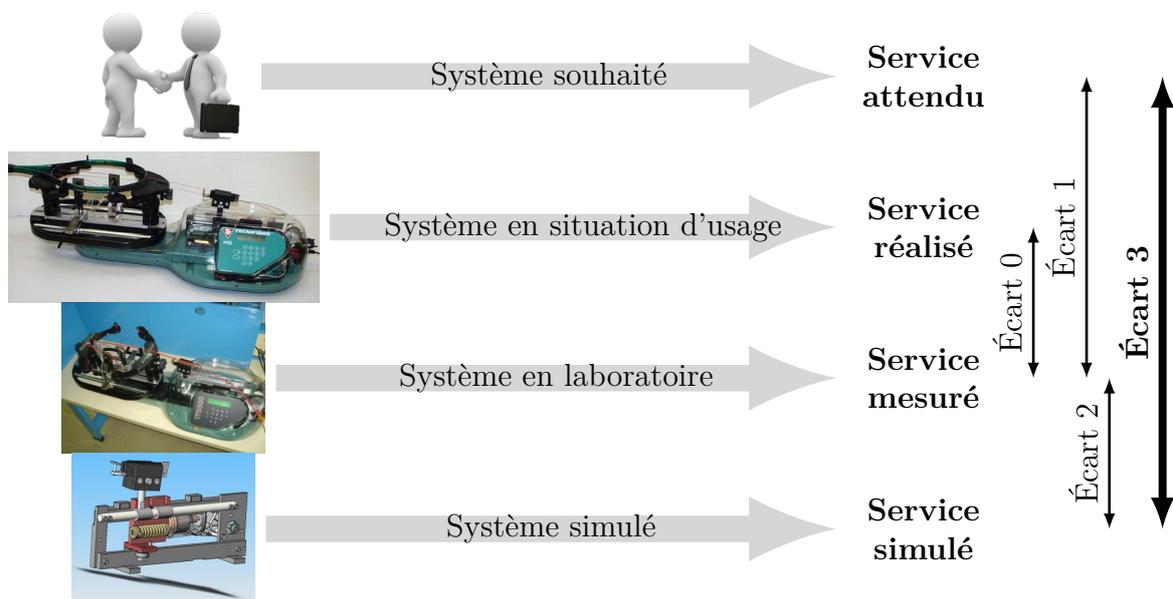


# Architecture des chaînes de conversion électromécanique

—  $TD_s$  —



**Écart 0** – évalue la fiabilité et la fidélité du système de laboratoire didactisé par rapport au système réel. Il répond aux questions « le système de laboratoire est-il représentatif du système réel ? Permet-il de l'étudier de manière fiable ? »

**Écart 1** – évalue le respect du CDCF par le système réel sur prototype instrumenté en laboratoire. Il répond à la question « le système réalisé, répond-il au CDCF ? ».

**Écart 2** – évalue la fiabilité du modèle et de ses hypothèses. Il répond à la question « le modèle est-il correct ? ».

**Écart 3** – évalue, en phase de conception, le respect du CDCF à partir d'un modèle simulé. Il répond à la question « le modèle du système satisfait-il les exigences du CDCF ? ».

*Activités de TD*

## Exercices

Exercice 1 – Étude d'un capteur de pression piézorésistif .....	3
Exercice 2 – Étude d'un capteur à effet Hall .....	6
Exercice 3 – Étude d'une sonde atténuatrice d'oscilloscope .....	9
Exercice 4 – Mesure de cavité souterraine .....	11
Exercice 5 – Séparateur magnétique .....	16
Exercice 6 – Étude d'une borne escamotable .....	18
Exercice 7 – Étude d'une enrouleuse de film .....	23
Exercice 8 – Laveuse autoportée .....	28
Exercice 9 – Direction automobile découplée .....	31
Exercice 10 – Étude d'une chaîne de recuit continu de tôles en Nickel .....	37

# Étude d'un capteur de pression piézorésistif

## Objectifs

Déterminer la caractéristique d'un capteur de pression piézorésistif et dimensionner les éléments de la chaîne d'acquisition de son signal.

### 1.1 Présentation

Pour assumer la gestion électronique d'un moteur, il a fallu implanter toute une série de capteurs pour acquérir des informations sur le régime moteur, la position des soupapes, la position des papillons, la pression d'admission, la température d'air d'admission, la température moteur et le niveau de tension de la batterie.

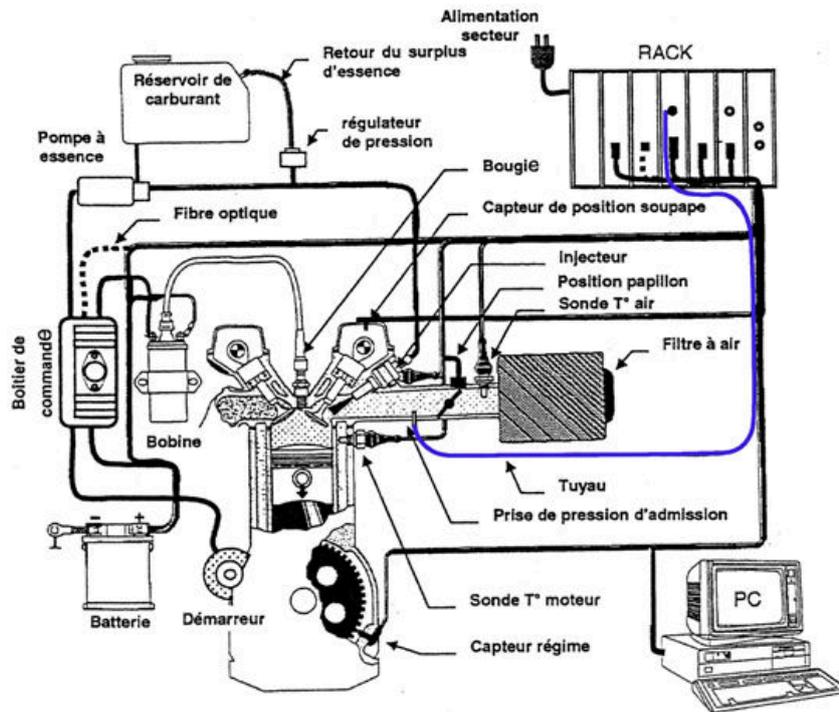


FIGURE 1.1 – Schéma de la gestion électronique de l'injection.

On étudie ici un capteur de pression d'admission, nécessaire à la cartographie d'injection. Il s'agit d'un capteur situé sur une carte du rack. La pression d'admission lui est acheminée depuis la pipe d'admission par un tuyau rigide. Le capteur retenu est un capteur piézorésistif de la série 26PC de Honeywell. Il comporte quatre capteurs résistifs montés en pont de Wheatstone. L'effet piézorésistif se traduit par une variation de résistance d'un semi-conducteur sous l'effet d'une contrainte.

### Temperature Compensated Sensors 26PC Series



#### Pin Designation

- Pin 1 =  $V_S$  (+)
- Pin 2 = Output (+)
- Pin 3 = Ground (-)
- Pin 4 = Output (-)

#### EXCITATION

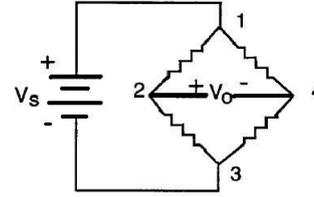


FIGURE 1.2 – Le capteur piézorésistif type 26PC de Honeywell et son montage équivalent.

## 1.2 Étude

Le domaine de mesure de la pression s'étalant de 0 à  $4 \cdot 10^5$  Pa, on désire obtenir la caractéristique de transfert  $V_{S2} = f(p)$  représentée sur la figure 1.3.

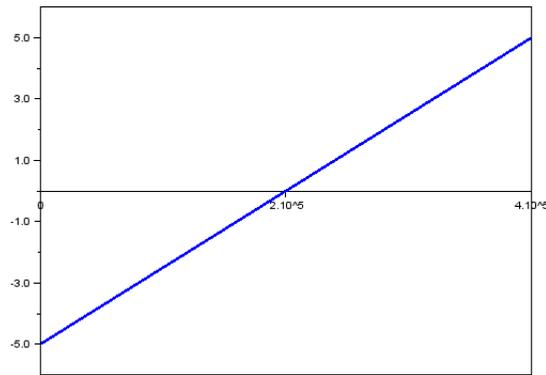


FIGURE 1.3 – Caractéristique du capteur.

**Question 1.1.** Déterminer la relation  $V_{S2} = f(p)$  pour le domaine exploré ( $V_{S2}$  en V et  $p$  en Pa).

Dans le vide ( $p = 0$  Pa) le schéma équivalent simplifié du capteur correspond à quatre résistors identiques  $R_0$  montées en pont. À une pression  $p$ , le schéma équivalent correspond à celui de la figure 1.4 où l'on voit que deux résistances ont augmenté alors que les deux autres ont diminué. L'effet piézorésistif est tel que la variation relative est proportionnelle à la pression :

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k p \quad \text{avec} \quad k = 2,50 \cdot 10^{-8} \text{ Pa}^{-1} \quad (\text{coefficient piézorésistif du capteur})$$

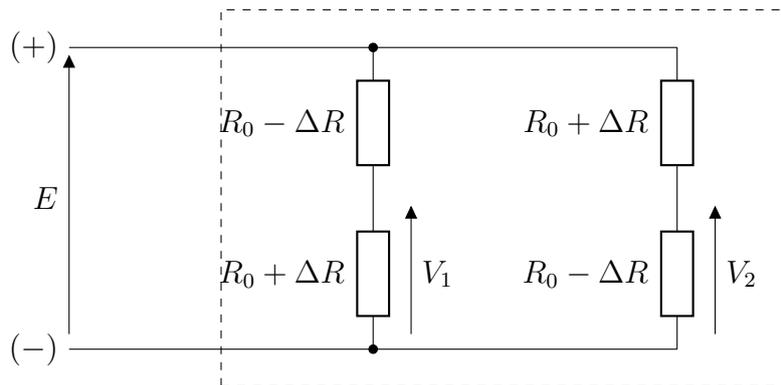


FIGURE 1.4 – Montage en pont de Wheatstone du capteur.

**Question 1.2.** Le capteur étant alimenté avec une tension continue  $E$ , exprimer  $V_1$  puis  $V_2$  en fonction de  $R_0$ ,  $\Delta R$  et  $E$ .

**Question 1.3.** En déduire l'expression de  $(V_1 - V_2)$  en fonction de  $k$ ,  $p$  et  $E$ . Calculer la valeur numérique de  $(V_1 - V_2)$  pour une pression  $p = 4 \cdot 10^5$  Pa sachant que  $E = 10$  V.

**Question 1.4.** Montrer que l'on peut écrire  $V_{S2} = -5 + 100(V_1 - V_2)$ .

Afin d'obtenir la caractéristique de transfert de la figure 1.3, on propose un montage conforme au schéma-blocs fonctionnel de la figure 6.3, constitué d'un amplificateur de différence et d'un sommateur – inverseur.

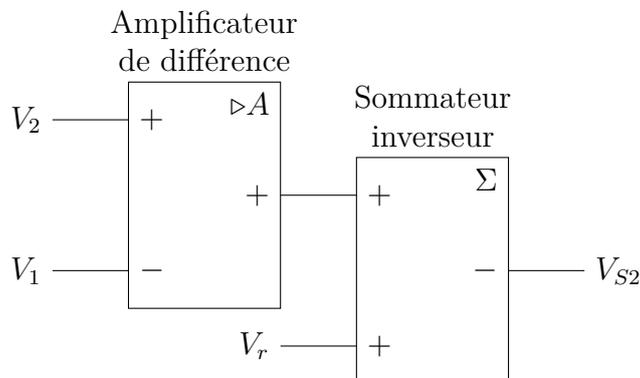


FIGURE 1.5 – Chaîne d'acquisition du signal.

**Question 1.5.** Exprimer  $V_{S2}$  en fonction de  $A$ ,  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_r$ .

**Question 1.6.** En tenant compte du résultat de la question précédente exprimer  $V_{S2}$  en fonction de  $A$ ,  $k$ ,  $p$ ,  $E$  et  $V_r$ . Déterminer les valeurs de  $A$  et de  $V_r$  pour obtenir le résultat souhaité, sachant que  $E = 10,0$  V.

## Étude d'un capteur à effet Hall

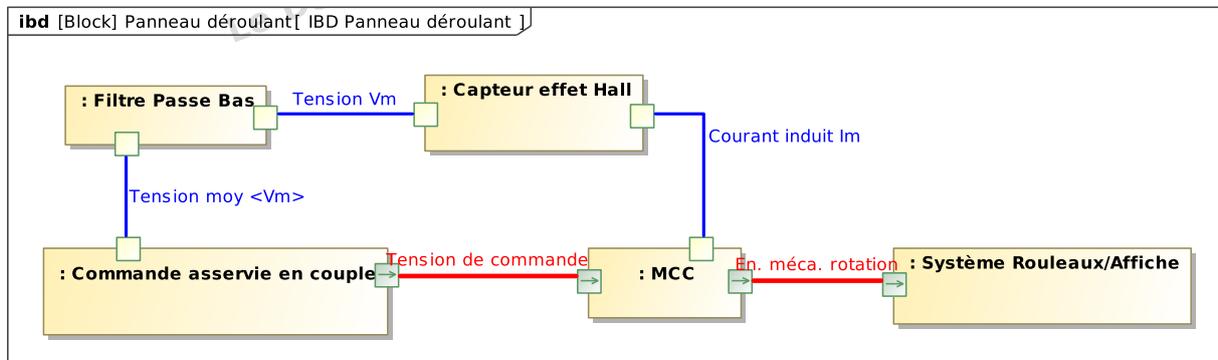
### Objectifs

Dimensionner un filtre passif afin d'obtenir la valeur moyenne du courant d'un moteur à courant continu nécessaire à son asservissement et déterminer la structure de commande du moteur.

Le panneau publicitaire déroulant, appartenant à la catégorie des MUPI (Mobilier urbain Pour l'Information) est un objet installé dans l'espace public. C'est un média de masse qui permet de toucher le consommateur sur son lieu de vie. La société J.C. DECAUX qui installe des mobiliers urbains fixes s'est intéressée depuis longtemps à pouvoir toucher un maximum de personnes grâce à l'utilisation de ces panneaux.



Un système constitué de deux moteurs à courant continu asservis en couple assure la rotation et le maintien en tension des affiches. L'estimation du couple au niveau de chaque moteur est réalisée en mesurant le courant d'induit avec à un capteur à effet Hall.



### 2.1 Étude du capteur à effet Hall

Le capteur utilisé dans le système de tension est illustré figure 2.1 et délivre une tension  $V_{im}$ . On obtient une tension  $V_{im}$  ( $1 \text{ V} \cdot \text{A}^{-1}$ ) image du courant  $I_m$  dans le moteur. L'allure de l'image du courant est représentée figure 2.2.

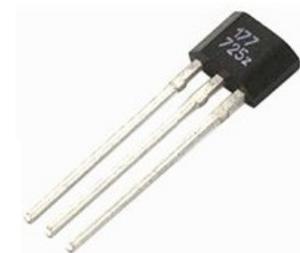


FIGURE 2.1 – Capteur à effet Hall.

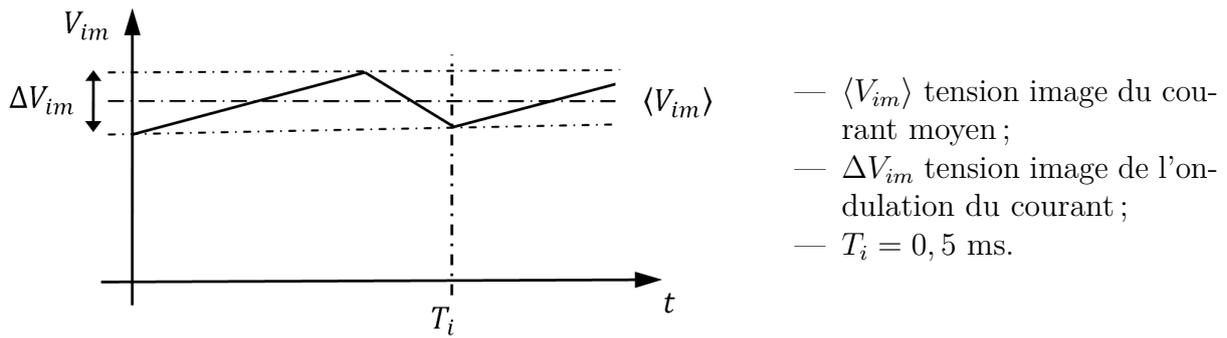


FIGURE 2.2 – Image du courant  $\langle I_m \rangle$ .

On désire dimensionner les composants du filtre passif afin d'obtenir l'image du courant moyen avec une atténuation de l'ondulation relative  $\left(\frac{\Delta V_{im}}{\langle V_{im} \rangle}\right)$  d'au moins 40 dB afin d'obtenir une valeur moyenne sans perturbation pour un asservissement correct. Pour cela on utilisera un filtre passif dont la structure est donnée ci-dessous. Enfin, l'étude sera menée avec une représentation complexe.

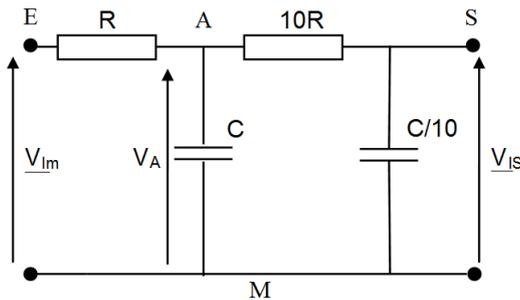


FIGURE 2.3 – Structure du filtre passif.

**Question 2.1.** Quel type de filtre permet de garder la composante continue et d'atténuer l'ondulation ?

**Question 2.2.** Exprimer la tension  $V_A$  en fonction des tensions  $V_{is}$  et  $V_{im}$  et des différents composants.

**Question 2.3.** Exprimer  $V_{is}$  en fonction de  $V_A$ .

**Question 2.4.** En déduire l'expression de la fonction de transfert et montrer qu'elle peut se mettre sous la forme :

$$\frac{V_{is}}{V_{im}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + \alpha j \frac{\omega}{\omega_0}} \quad \text{avec} \quad \omega_0 = \frac{1}{RC}$$

**Question 2.5.** On désire une atténuation de 40 dB du fondamental  $\omega_i$  du signal  $V_{im}$ . Compte tenu de la fréquence de ce signal calculer la valeur de la pulsation  $\omega_0$ .

**Question 2.6.** *Afin de ne pas charger de trop le capteur à effet Hall, on désire que l'impédance d'entrée minimale du montage ne soit pas inférieure à  $1\text{ k}\Omega$ . Préciser la valeur de  $R$ .*

**Question 2.7.** *En déduire la valeur de  $C$ .*

## 2.2 Étude de la commande des moteurs

Le système de motorisation est réalisé par deux moteurs électriques à courant continu. Lors de la rotation du panneau pour faire « descendre » une affiche, les deux moteurs tournent dans le même sens. Celui du bas entraîne l'affiche alors que celui du haut la freine pour la maintenir en tension. Lors de la « montée » d'une affiche, les deux moteurs tournent dans l'autre sens. Cette fois, c'est celui du haut qui assure l'entraînement et celui du bas qui maintient la tension. Dans les deux cas, les normes des couples moteurs sont identiques en haut et en bas.

**Question 2.8.** *Déterminer les quadrants de fonctionnement mécanique de chacun des deux moteurs.*

**Question 2.9.** *Proposer une structure de hacheur permettant de commander chaque moteur.*

## Étude d'une sonde atténuatrice d'oscilloscope

### Objectif

Régler une sonde atténuatrice de tension passive en amont d'un oscilloscope.

L'oscilloscope a une impédance d'entrée en général constituée par une résistance de  $1\text{ M}\Omega$  et d'un condensateur en parallèle de  $15$  à  $50\text{ pF}$ . Les sondes atténuatrices passives en tension sont utilisées pour bénéficier de toutes les performances en fréquence et en temps de montée de l'oscilloscope. Elle augmente l'impédance d'entrée (vue par le circuit sous test) et réduit l'influence des capacités du câble blindé et de l'oscilloscope. Le circuit équivalent à une mesure avec oscilloscope et sonde atténuatrice est donné ci-dessous.

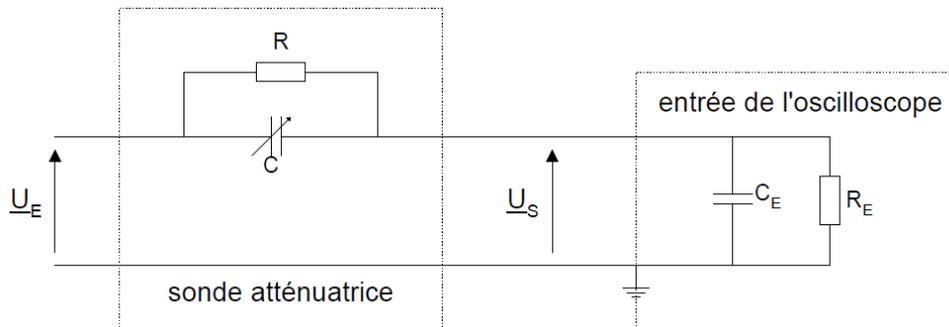


FIGURE 3.1 – Modèle équivalent pour une mesure avec sonde atténuatrice.

### Extrait du cahier des charges

Le cahier des charges impose que la lecture des signaux sinusoïdaux appliqués en entrée de l'oscilloscope soit indépendante de la fréquence de ces signaux. De plus, on impose un rapport  $\frac{Z}{Z_e} > 10$ .

**Question 3.1.** Montrer que la fonction de transfert du circuit est définie par :

$$H(p) = \frac{U_S}{U_E} = \frac{\frac{1}{R} + Cp}{\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_E}\right) + (C + C_E)p}$$

Pour utiliser cette sonde, il faut au préalable régler le condensateur ajustable  $C$  de manière à effectuer la « compensation en fréquence ». La compensation en fréquence consiste à rendre le comportement de la sonde indépendant de la fréquence du signal d'entrée en régime sinusoïdal, donc de  $p$  sous la forme générale de la fonction de transfert précédente.

**Question 3.2.** Déterminer la relation liant  $R$ ,  $C$ ,  $R_E$  et  $C_E$  quand la sonde est compensée en fréquence. Que vaut alors l'expression de  $H$  ?

On dispose d'une sonde X10 avec  $R = 9 \text{ M}\Omega$ . On a  $R_E = 1 \text{ M}\Omega$  (résistance d'entrée de l'oscilloscope) et  $C_E = 90 \text{ pF}$  (capacité de l'entrée de l'oscilloscope et du câble coaxial de liaison).

**Question 3.3.** À quelle valeur faut-il régler  $C$  pour être parfaitement compensé ? En déduire  $H$  le gain de la sonde en dB.

On note  $\underline{Z}_E$  l'impédance d'entrée de l'oscilloscope et  $\underline{Z}$  l'impédance vue de l'entrée de la sonde.

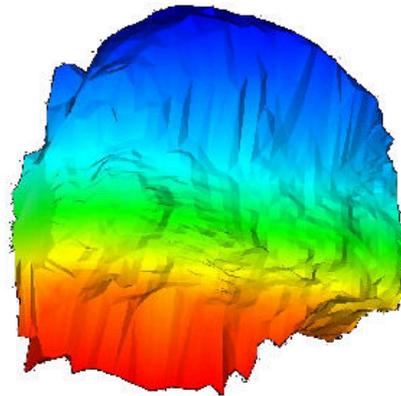
**Question 3.4.** Avec les valeurs numériques précédentes et en prenant  $C = 10 \text{ pF}$ , vérifier le respect du cahier des charges fonctionnelles.

## Mesure de cavité souterraine

### Objectifs

Étudier le système de régulation de la tension d'alimentation d'une sonde de mesure de cavité souterraine.

Le sous-sol français possède de nombreuses cavités soit naturelles (coulées de lave) soit liées à des activités humaines (mines). Le Centre d'Expertise du Bâtiment des Travaux Publics (CEBTP) utilise une mesure par télémètre laser. Un forage vertical est réalisé jusqu'à la cavité et un outil « sonde » est introduit. Il transmet les mesures en surface. Le volume de la cavité est alors calculé et une visualisation 3D peut être générée.



Le système étudié peut se décomposer en deux parties (figure 4.1) :

- le treuil, composé d'un motoréducteur et d'un variateur permettant la montée et la descente de la sonde dans le trou de forage ;
- la sonde permettant l'acquisition de la forme de la cavité.

#### Extrait du cahier des charges

L'alimentation de la sonde doit être de  $U_S = 24 \text{ V} \pm 5 \%$  pour compenser les chutes de tension et permettre son bon fonctionnement.

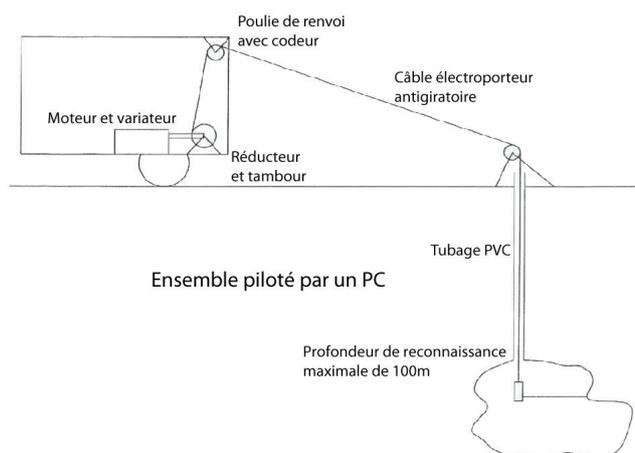


FIGURE 4.1 – Le système et sa sonde.

## 4.1 Étude de la régulation de tension de la sonde

Pour réduire au maximum le nombre de conducteurs, seule la tension +24 VDC est envoyée depuis la surface ; les autres tensions sont réalisées au niveau de la sonde. On utilise aussi une liaison série de type RS485 pour communiquer avec l'ensemble des constituants. Une carte micro-programmée déportée dans la sonde permet d'envoyer et de recevoir tous les signaux. Pour maintenir la tension  $U_S$  constante aux bornes de la sonde, on utilise une alimentation régulée qui comporte un hacheur afin de faire varier la valeur moyenne de la tension. Deux conducteurs supplémentaires permettent de mesurer la tension  $U_S$  aux bornes de la sonde pour effectuer la régulation (voir figure 4.2).

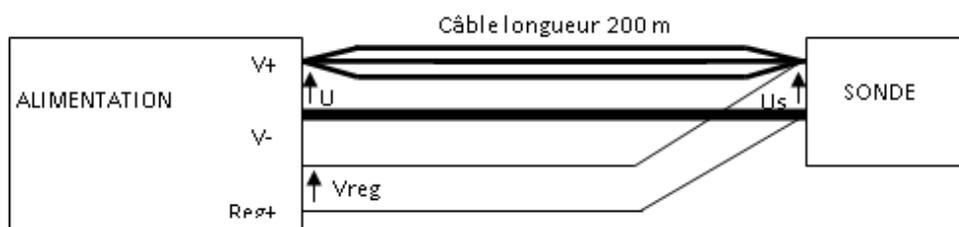


FIGURE 4.2 – Principe d'alimentation de la sonde.

Le schéma de la régulation de tension est donné sur la figure 4.3 où  $A$  et  $K$  sont des gains purs,  $\alpha$  le rapport cyclique du hacheur et  $W = \frac{1}{8} \text{ V}^{-1}$ .

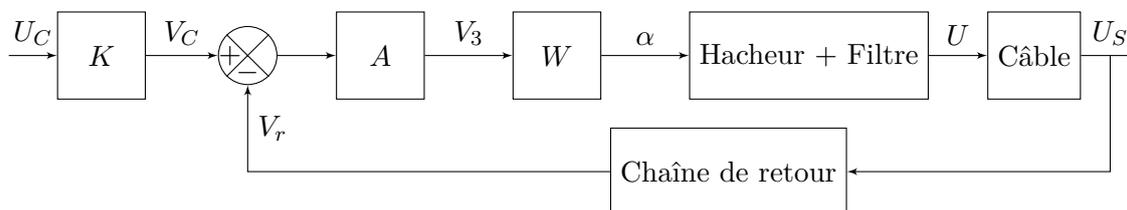


FIGURE 4.3 – Schéma blocs de la régulation de tension.

La fonction de transfert  $H(p)$  de l'ensemble {hacheur + filtre} est équivalente à une fonction du premier ordre de gain  $H_0 = 100 \text{ V}$  et de constante de temps  $\tau_1 = 8 \cdot 10^{-4} \text{ s}$ .

### 4.1.1 Étude de la partie « câble »

Soit  $R_c$  la résistance totale de la boucle d'alimentation +24 VDC de la sonde. On souhaite faire apparaître une perturbation de courant  $I$  dans le schéma fonctionnel de la figure 4.3.

**Question 4.1.** Montrer que le schéma fonctionnel de la partie « câble » peut se mettre sous la forme de la figure 4.4. Déterminer les grandeurs manquantes.

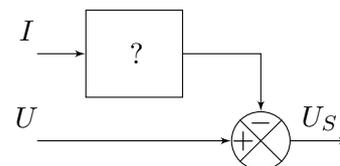


FIGURE 4.4 – Modèle pour le câble

### 4.1.2 Étude de la chaîne de retour et du comparateur

Tous les amplificateurs opérationnels utilisés dans le montage de la figure 4.5 sont considérés comme parfaits. Ils sont alimentés en  $+12\text{ V}$  et  $-12\text{ V}$  et leurs tensions de saturation valent respectivement  $+V_{sat} = +12\text{ V}$  et  $-V_{sat} = -12\text{ V}$ .

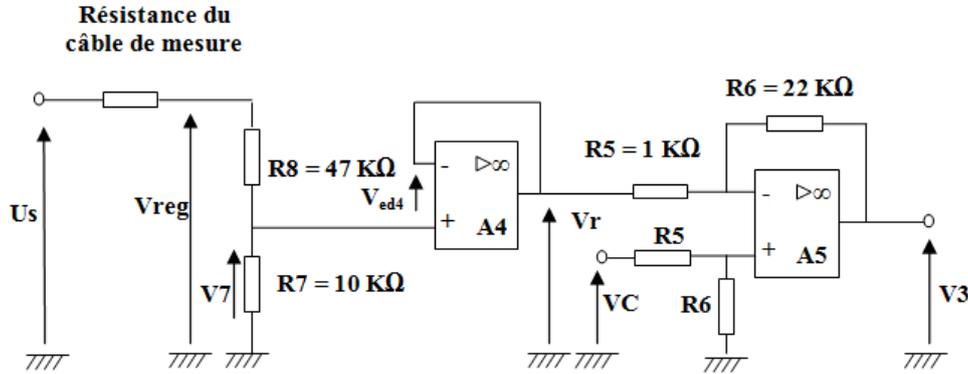


FIGURE 4.5 – Chaîne de retour et comparateur.

L'amplificateur  $A4$  constitue un montage suiveur à haute impédance d'entrée tel que  $V_r = V_7$ . L'amplificateur  $A5$  réalise un montage soustracteur tel que  $V_3 = \frac{R_6}{R_5}(V_C - V_r)$ . On a alors  $A = 22$ .

**Question 4.2.** Justifier que l'on puisse négliger la chute de tension dans les conducteurs de mesure.

**Question 4.3.** Montrer que  $V_r$  peut s'exprimer sous la forme  $V_r = k U_S$ . Déterminer alors  $k$  en fonction de  $R_7$ ,  $R_8$ . En déduire  $V_r$  quand  $U_S = 24\text{ V}$ .

### 4.1.3 Étude de l'ensemble en régime établi

L'objectif est de réguler la tension d'alimentation de la sonde à  $U_S = 24\text{ V}$  ( $\pm 5\%$ ).

**Question 4.4.** Sachant que  $K = k$ , déterminer la valeur de la tension  $U_C$  et du rapport cyclique  $\alpha$  pour obtenir une tension  $U_S = 24\text{ V}$  en fonctionnement à vide.

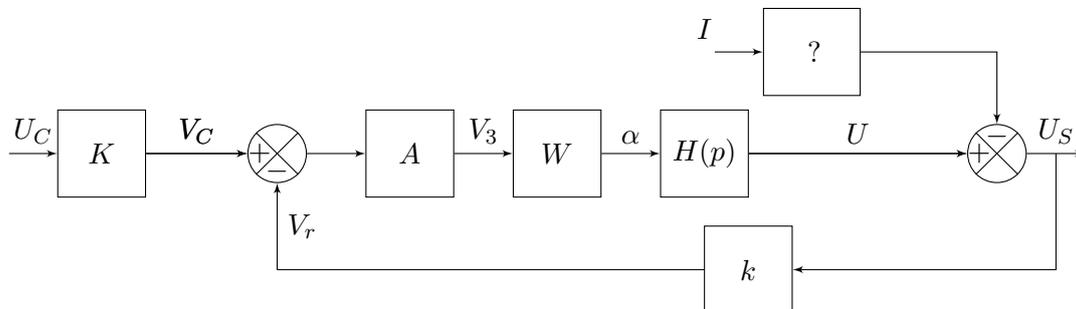


FIGURE 4.6 – Boucle de régulation.

**Question 4.5.** Pour la même tension  $U_C$  mais avec un courant  $I \neq 0$ , déterminer l'expression littérale de  $U_S$  en fonction de  $A, W, H_0, U_C, R_c, I$  et  $k$ .

Effectuer l'application numérique de  $U_S$  pour la charge maximale de la sonde  $I = 3 \text{ A}$  sachant que la résistance du câble est  $R_c = 3,5 \Omega$ . Conclure.

**Question 4.6.** Sur quelle grandeur est-il possible d'agir pour diminuer cette erreur ?

#### 4.1.4 Étude de la régulation en régime dynamique

En réalité la charge ne peut être assimilée à une résistance. En effet, le moteur pas à pas crée un échelon de courant  $\Delta i$  de 2 A à chaque fois que la sonde se déplace d'un pas. De plus, le câble présente une inductance équivalente dont on ne pourra plus négliger les effets. On aura alors l'impédance du câble  $Z_c = R_c + L_c p$  avec  $L_c = 2 \text{ mH}$ .

**Question 4.7.** Montrer que l'on peut ramener la boucle de régulation de la figure 4.6 au schéma-blocs de la figure 4.7 sachant que  $U_{ca}$  représente la chute de tension dans le câble. Déterminer  $T(p)$  et  $V(p)$ .

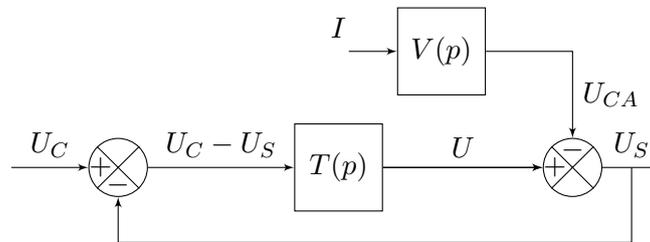


FIGURE 4.7 – Boucle de régulation avec la perturbation.

**Question 4.8.** Exprimer  $U_S(p)$  en fonction de  $U_C(p)$  et  $I(p)$ .

On suppose maintenant que la sonde est en régime établi avec  $I = 1 \text{ A}$  (constant). La consigne  $U_C$  est toujours réglée à 24 V.

**Question 4.9.** Si on applique un échelon de courant  $\Delta I = 2 \text{ A}$  sur l'entrée courant, montrer que  $\Delta U_S(p)$  peut se mettre sous la forme :

$$\Delta U_S(p) = -\Delta I R_0 \frac{(1 + \tau_c p)(1 + \tau_1 p)}{(1 + \tau_2 p)p}$$

Déterminer les expressions de  $R_0, \tau_c$  et  $\tau_2$ . Faire l'application numérique.

**Question 4.10.** En utilisant le théorème de la valeur finale, déterminer la chute de tension  $\Delta U_S(\infty)$  en régime établi et, en utilisant le théorème de la valeur initiale, calculer la valeur théorique de  $\Delta U_S(t)$  à  $t = 0$ .

Un essai a montré qu'en réalité la tension chute de 14 V au moment de l'apparition de l'échelon de courant (déplacement d'un pas), provoquant ainsi la mise en défaut de la carte de commande du moteur pas à pas. Pour éviter ce creux de tension, on place un condensateur  $C$  aux bornes de la sonde. Soit  $I_c$  le courant dans ce condensateur.

**Question 4.11.** Déterminer la fonction de transfert de la figure 4.8 :  $F(p) = \frac{I_c(p)}{U_S(p)}$ .

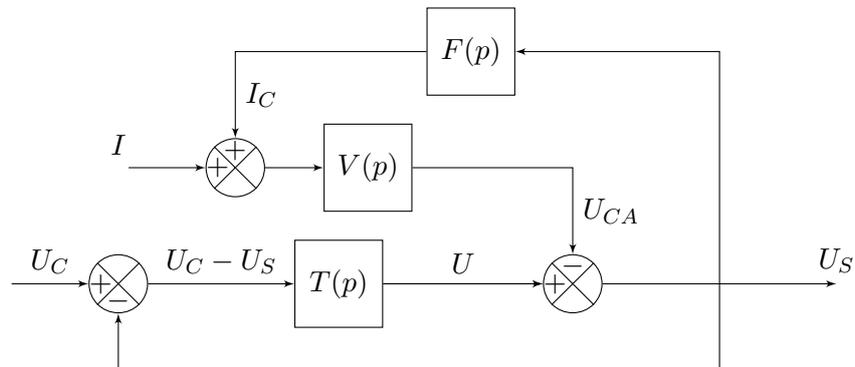


FIGURE 4.8 – Boucle de régulation avec perturbation et condensateur.

**Question 4.12.** Finalement :

- en déduire  $U_S(p)$  en fonction de  $I(p)$  en considérant toujours  $U_C = \text{constante}$  ;
- déterminer  $\Delta U_S(p)$  si on applique un échelon de courant  $\Delta I = 2 \text{ A}$  ;
- montrer alors qu'il n'y a plus de creux de tension ;
- conclure par rapport au cahier des charges.

## Séparateur magnétique

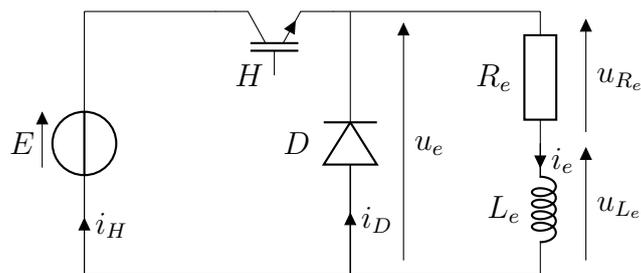
### Objectifs

Étude du comportement électrique d'un séparateur magnétique.

On étudie ici un séparateur magnétique utilisé pour séparer les matériaux ferreux des déchets déroulant sur une bande convoyeuse. La figure ci-contre illustre ce type de mécanisme.



L'alimentation du séparateur se fait grâce à un électroaimant, assimilable à une bobine en série avec une résistance. Les concepteurs ont prévu que l'aimantation du séparateur puisse être variable en fonction du type de déchets à traiter. Cette variation d'aimantation est réalisée grâce à un hacheur série.



### Extrait du cahier des charges

Pour la sécurité des composants, le cahier des charges impose une valeur maximale de l'ondulation de courant égale à 2 % de la valeur moyenne du courant établi en régime permanent.

On donne les valeurs :

$$E = 140 \text{ V} \quad R_e = 50 \text{ } \Omega \quad L_e = 1 \text{ mH}$$

On considère que l'interrupteur  $H$  est fermé pour  $t \in [0, \alpha T]$  et ouvert pour  $t \in [\alpha T, T]$ .

**Question 5.1.** *Quel est le rôle de la diode  $D$  ? Est-elle utile ici ?*

**Question 5.2.** *Représenter l'allure de  $u_e(t)$ . Calculer sa valeur moyenne  $\langle u_e \rangle$ .*

**Question 5.3.** *Calculer la valeur moyenne de  $i_e$ .*

**Question 5.4.** *L'utilisateur du séparateur a besoin d'une force magnétique correspondant à un courant de 2 A, quel rapport cyclique doit-il appliquer ?*

**Question 5.5.** *Donner l'expression du courant  $i_e(t)$  dans les différentes phases. Représenter son allure.*

**Question 5.6.** *Calculer l'ondulation du courant dans la charge définie par  $\Delta i_e$  en fonction de  $\alpha$ . Déterminer alors, en réalisant les approximations nécessaires, la fréquence minimale de commutation de l'interrupteur.*

## Étude d'une borne escamotable

### Objectifs

Déterminer les caractéristiques d'un moteur à courant continu d'après des essais afin de pouvoir étudier sa commande et quantifier sa consommation énergétique pour animer une borne escamotable.

Le dispositif étudié (figure 6.1) est un système permettant de limiter ou d'interdire la circulation dans des zones à accès réservé. Ce dispositif comporte :

- un caisson intégrant une borne motorisée rétractable dans le sol ;
- un caisson intégrant la partie commande comportant une platine électronique de gestion, une batterie d'alimentation électrique du système et des cellules photovoltaïques assurant la charge de la batterie.

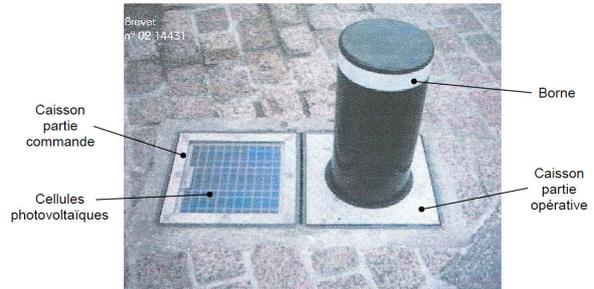
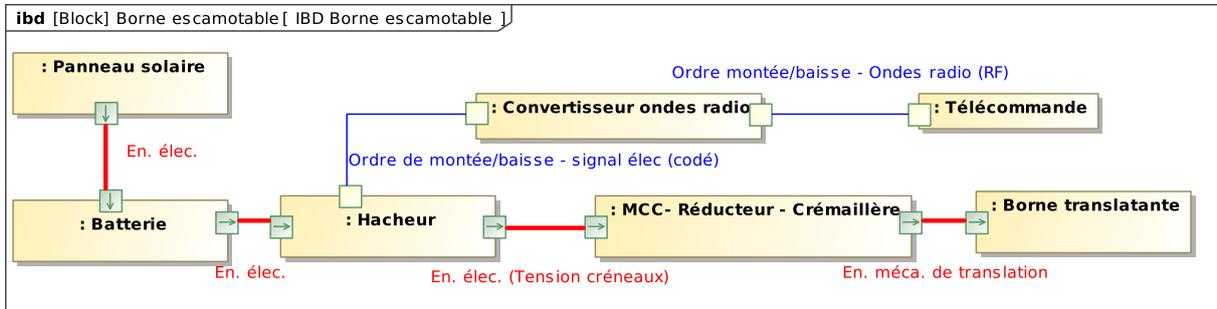


FIGURE 6.1 – Présentation du système.



### 6.1 Modélisation du moteur

L'objectif de cette partie est d'établir le modèle équivalent du motoréducteur à courant continu équipant le système (figure 6.2). Celui-ci est l'association d'un moteur à aimants permanents de tension nominale 12 V et d'un réducteur de rapport 1/60. Les valeurs de chaque paramètre seront identifiées à partir de différents résultats d'essais.



FIGURE 6.2 – Motoréducteur

L'induit du moteur peut être représenté par son schéma électrique équivalent, faisant intervenir sa résistance notée  $R_m$ , son inductance notée  $L_m$ , et sa force électromotrice notée  $E_m$ .

**Question 6.1.** Sachant que l'on note  $I_m$  le courant absorbé par le moteur et  $U_m$  sa tension d'alimentation, représenter le schéma équivalent de l'induit du moteur en utilisant une convention récepteur.

### 6.1.1 Essai rotor bloqué

On alimente le moteur avec une tension réduite et parfaitement continue, tout en maintenant le rotor bloqué.

**Question 6.2.** Montrer que cet essai permet de déterminer la valeur de  $R_m$ , dont on donnera l'expression.

Lors d'un essai rotor bloqué, on mesure  $U_m = 2,511$  V et  $I_m = 2,7$  A.

**Question 6.3.** Déduire de cet essai la valeur numérique de  $R_m$ .

### 6.1.2 Essai en charge

La vitesse angulaire de l'arbre moteur est notée  $\Omega_m$ .

**Question 6.4.** En considérant le courant  $I_m$  parfaitement continu, exprimer  $K_m$ , la constante de fém du moteur, en fonction de  $U_m$ ,  $R_m$ ,  $I_m$  et  $\Omega_m$ .

Lors d'un essai en charge, on mesure  $U_m = 12$  V,  $I_m = 2,7$  A et  $\Omega_m = 206,28$  rad·s<sup>-1</sup>.

**Question 6.5.** Déduire de cet essai la valeur numérique de  $K_m$ .

### 6.1.3 Détermination de l'inductance d'induit $L_m$

Le moteur est déconnecté du système pour être alimenté par le montage donné sur la figure 6.3. La tension  $E_H$  est constante et sa valeur est positive. Le courant  $i_m(t)$  est

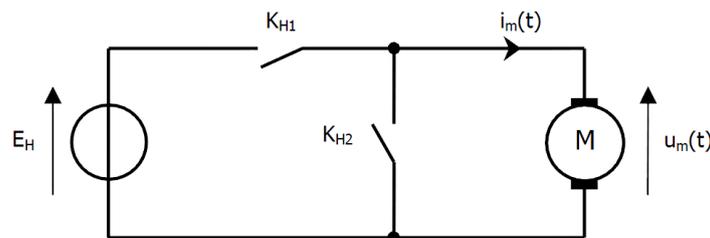


FIGURE 6.3 – Essai du moteur avec un convertisseur électronique.

toujours strictement positif.  $K_{H1}$  et  $K_{H2}$  sont deux interrupteurs électroniques considérés parfaits commandés de façon périodique et complémentaire telle qu'il y ait deux phases différentes de fonctionnement par période  $T_H$  :

- la première phase, de durée  $\alpha T_H$  (avec  $0 < \alpha < 1$ ),  $K_{H1}$  est passant et  $K_{H2}$  est bloqué ;
- la seconde phase, soit le reste du temps,  $K_{H1}$  est bloqué et  $K_{H2}$  est passant.

**Question 6.6.** Quel nom porte ce convertisseur électronique ? Comment appelle-t-on la grandeur notée  $\alpha$  ?

Le convertisseur est constitué d'une diode et d'un transistor.

**Question 6.7.** Dessiner le schéma du montage en faisant apparaître l'emplacement de ces composants.

**Question 6.8.** Parmi les sigles suivants, déterminer lesquels correspondent à des technologies de transistor : GTI, MOS, IGBT, AOC et MMX.

Quelles sont les fréquences maximales de fonctionnement de chacun de ces composants ? Donner uniquement un ordre de grandeur.

L'étude est menée en régime permanent. La période  $T_H$  ayant une valeur très inférieure à  $\frac{L_m}{R_m}$ , la résistance  $R_m$  sera négligée pour les six questions suivantes.

**Question 6.9.** Exprimer  $U_{m[ moy ]}$ , la valeur moyenne de la tension  $u_m(t)$  en fonction de  $\alpha$  et  $E_H$ . Détailler le calcul.

**Question 6.10.** Exprimer la fém du moteur  $E_m$  en fonction de  $\alpha$  et  $E_H$ . Préciser les hypothèses qui mènent à cette relation.

**Question 6.11.** Donner l'expression de  $i_m(t)$  lorsque  $K_{H1}$  est fermé. On notera  $I_{m[ min ]}$  la valeur du courant au début de cette phase de fonctionnement.

**Question 6.12.** En déduire l'expression de  $L_m$  en fonction de  $E_H$ ,  $T_H$ ,  $\alpha$  et  $\Delta I_m$ , l'ondulation de courant définie par  $\Delta I_m = I_{m[ max ]} - I_{m[ min ]}$ .

La figure 6.4 montre la tension appliquée au moteur et le courant qu'il absorbe lors d'un essai réalisé avec le convertisseur électronique.

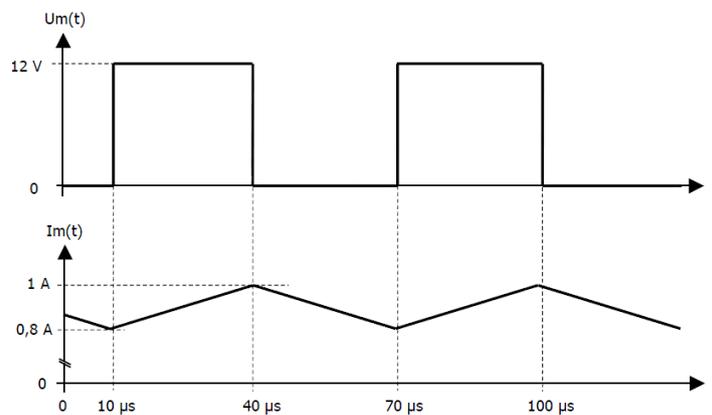


FIGURE 6.4 – Tension et courant du moteur avec le convertisseur électronique.

**Question 6.13.** Déduire les valeurs numériques de  $E_H$ ,  $T_H$ ,  $\alpha$  et  $\Delta I_m$  correspondantes à cet essai.

**Question 6.14.** En déduire la valeur numérique de  $L_m$ .

## 6.2 Modélisation complète du système

L'objectif de cette partie est de qualifier la consommation énergétique du système. Le système complet peut être modélisé par le schéma bloc de la figure 6.5.

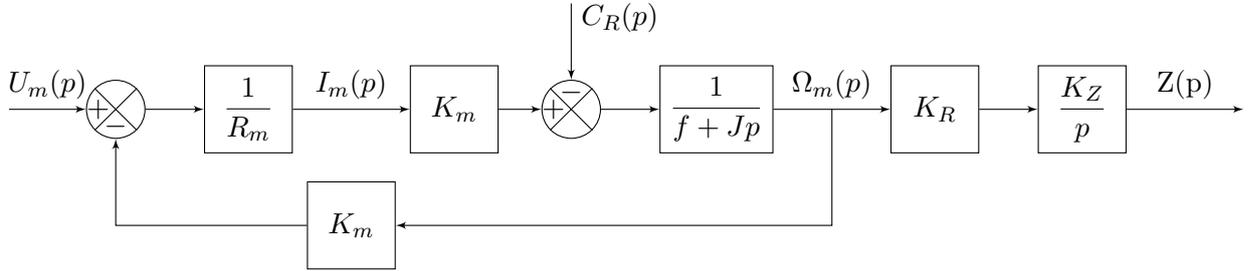


FIGURE 6.5 – Modélisation complète du système.

Notations	Signification
$U_m$	Tension appliquée au moteur (en V)
$R_m$	Résistance de l'induit du moteur (en $\Omega$ )
$I_m$	Courant absorbé par le moteur (en A)
$K_m$	Constante du moteur (en $V/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$ ou $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$ )
$C_R$	Couple résistant sur l'arbre moteur (charge et frottements secs)
$f$	Coefficient de frottement visqueux (en $\text{N}\cdot\text{m}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$ )
$J$	Inertie totale ramenée sur l'arbre moteur (en $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )
$\Omega_m$	Vitesse angulaire de l'arbre moteur (en $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$K_R$	Rapport de réduction du réducteur de vitesse : $K_R = 1/60$
$\frac{K_Z}{p}$	Fonction de transfert de la transmission $K_Z = 30 \text{ mm}$
$Z$	position de la borne (en mm). En position rentrée $Z = 0 \text{ mm}$

À partir du schéma-blocs, on peut déterminer  $H_1(p)$  et  $H_2(p)$  telles que :

$$Z(p) = H_1(p) U_m(p) - H_2(p) C_R(p)$$

avec :

$$H_1(p) = \frac{A}{(1 + \tau p) p} \quad H_2(p) = \frac{B}{(1 + \tau p) p}$$

et

$$A = \frac{K_m K_R K_Z}{K_m^2 + f R_M} \quad B = \frac{R_m K_R K_Z}{K_m^2 + f R_M} \quad \tau = \frac{R_m J}{K_m^2 + f R_M}$$

### 6.2.1 Évolution de la position de la borne

Le moteur est relié à la batterie du système par l'intermédiaire de contacts électromécaniques (commande TOR), comme le montre la figure 6.6. L'effet de la résistance de la batterie en fonction du courant demandé est négligé et sa tension nominale est supposée constant à  $E_B = 12 \text{ V}$ . L'application d'une tension positive sur le moteur induit une montée de la borne.

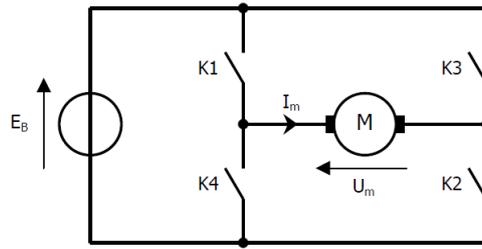


FIGURE 6.6 – Commande du moteur.

**Question 6.15.** Déterminer la position des interrupteurs  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  et  $K_4$  lors d'une montée et lors d'une descente de la borne.

**Question 6.16.** Pour  $U_m(p) = \frac{E_B}{p}$  et  $C_R(p) = \frac{C_{R0}}{p}$  déterminer l'expression de  $Z(p)$  en fonction de  $A$ ,  $B$ ,  $E_B$ ,  $C_{R0}$ ,  $\tau$  et  $p$ .

**Question 6.17.** Vérifier que le temps de montée  $T_m$  nécessaire pour passer de  $Z = 0$  à  $Z = 500$  mm est égale à 5,84 s sachant que, lors de la montée, le couple résistant  $C_{R0}$  est égal à 0,192 N · m et avec  $A = 10,6$  (mm/s)/V,  $B = 214$  (mm/s)/N · m et  $\tau = 31,1$  ms.

### 6.2.2 Courant absorbé par le moteur

Toujours en exploitant le schéma blocs, l'expression du courant peut s'écrire :

$$I_m(p) = C \frac{1 + \tau' p}{1 + \tau p} U_m(p) + D \frac{1}{1 + \tau p} C_R(p)$$

$$\text{avec } C = \frac{f}{K_m^2 + f R_M} \quad D = \frac{K_m}{K_m^2 + f R_M} \quad \tau = \frac{J R_m}{K_m^2 + f R_M} \quad \tau' = \frac{J}{f}$$

**Question 6.18.** Pour  $U_m(p) = \frac{E_B}{p}$  et  $C_R(p) = \frac{C_{R0}}{p}$  déterminer l'expression de  $I_m(p)$  en fonction de  $C$ ,  $D$ ,  $E_B$ ,  $C_{R0}$ ,  $\tau$ ,  $\tau'$  et  $p$ .

**Question 6.19.** Dédurre de la question précédente l'expression de  $I_m(t)$  pour la montée.

**Question 6.20.** Représenter l'évolution de  $I_m(t)$  lors de la montée. Précisez les valeurs en début et fin de démarrage du moteur.

On prendra  $C = 26,28 \cdot 10^{-3} \Omega^{-1}$ ,  $D = 21,208$  A/N · m,  $\tau = 31,1$  ms et  $\tau' = 1,27$  s.

**Question 6.21.** Par un calcul simple, donner une valeur numérique approchée de  $W_m$  l'énergie que doit fournir la batterie lors d'une montée de la borne.

## Étude d'une enrouleuse de film

### Objectifs

Modéliser le moteur à courant continu, sa commande et son asservissement permettant d'animer la roue d'enroulement et étudier l'acquisition du signal provenant du capteur de position du galet.

L'étude concerne un dispositif d'enroulement de film à effort de traction constant. Le système comporte une roue principale d'enroulement (notée  $R_p$ ) et un galet de mesure de tension (noté  $G_t$ ), libre de se mouvoir verticalement et dont la position  $x(t)$  reflète la tension du film. La roue  $R_p$  tourne à la vitesse  $\omega_p(t)$  grâce à un moteur d'entraînement à courant continu asservi en couple. Il est donc nécessaire de déterminer le couple  $\gamma_p$  à produire sur la roue pour assujettir la traction  $x(t)$  à suivre sa consigne  $x_r$ . Le schéma simplifié de ce système est donné figure 7.1.

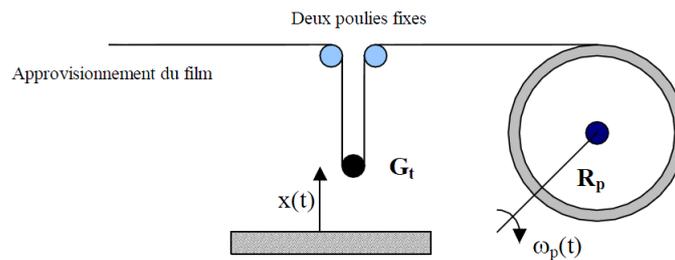


FIGURE 7.1 – Schéma du système d'enroulement de film.

### 7.1 Étude du moteur d'entraînement

#### Extrait du cahier des charges

Le moteur doit avoir un rendement supérieur à 90 % et pouvoir être alimenté à sa tension nominale  $U_n$  et asservi en courant avec une erreur de maximum 10 %.

#### 7.1.1 Modélisation

Le moteur étudié est un moteur à courant continu à excitation par aimants permanents. Ses caractéristiques nominales sont les suivantes (lues sur sa plaque signalétique) :

- Tension nominale :  $U_n = 150$  V ;
- Vitesse nominale :  $\Omega_n = 2400$  tr/min ;
- Courant nominal :  $I_n = 10$  A

Par ailleurs le constructeur fournit les paramètres suivants :

- Résistance du bobinage d'induit :  $R = 1 \Omega$  ;
- Inductance propre du bobinage d'induit :  $L = 12,5 \text{ mH}$  ;
- Coefficients de frottement sec et visqueux : négligeables ;
- Moment d'inertie du rotor :  $J_m = 200 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$ .

On rappelle que le schéma équivalent d'un tel moteur, vis à vis de sa tension d'induit, est composé d'une force électromotrice, notée  $E$ , en série avec la résistance  $R$  et l'inductance  $L$ . On rappelle également que le couple moteur, noté  $\gamma_m$ , est proportionnel au courant d'induit moyen, noté  $i_m$ , de la même façon que la fém  $E$  est proportionnelle à la vitesse de rotation  $\Omega_m$ , par les relations suivantes :

$$\gamma_m = k_\varphi i_m \quad \text{et} \quad E = k_\varphi \Omega_m \quad (k_\varphi \text{ est un coefficient constant})$$

**Question 7.1.** À partir des données constructeurs au point nominal, déterminer la valeur numérique de la constante  $k_\varphi$ . En déduire la valeur numérique du couple nominal, noté  $\gamma_n$ .

**Question 7.2.** Calculer numériquement :

- la puissance mécanique nominale disponible, notée  $\mathcal{P}_n$  ;
- le rendement nominal de ce moteur, noté  $\eta_n$ .

Le cahier des charge est-il respecté ?

### 7.1.2 Alimentation du moteur par hacheur série

Le moteur est alimenté par un hacheur série qui impose la tension aux bornes de son enroulement d'induit. Le schéma équivalent de l'ensemble est représenté sur la figure 7.2.

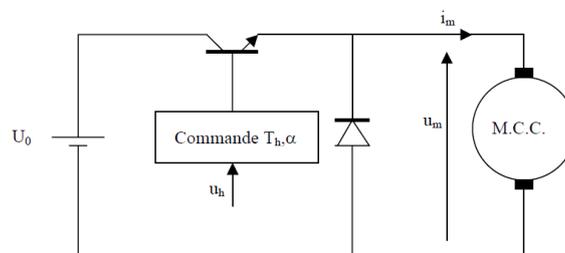


FIGURE 7.2 – Schéma équivalent du moteur à courant continu et de sa commande.

La tension d'alimentation du hacheur est supposée constante, égale à  $U_0 = 200 \text{ V}$ . Le rapport cyclique  $\alpha$  de commande du hacheur est « fabriqué » à partir d'une tension de commande  $u_h$  telle que  $\alpha = \frac{u_h}{U_{hm}}$  avec  $U_{hm} = 10 \text{ V}$ . La fréquence de fonctionnement de ce hacheur est notée  $f_h = 1/T_h$ . Le transistor et la diode sont supposés parfaits, commutant instantanément, c'est-à-dire qu'ils n'ont chacun que deux états possibles : fermé (équivalent à un court-circuit) et ouvert (équivalent à un circuit ouvert). Le transistor est passant entre les instants 0 et  $\alpha T_h$  et la diode est passante le restant de la période.

**Question 7.3.** Quelles sont les valeurs minimale  $U_{h0}$  et maximale  $U_{h1}$  de la tension de commande  $u_h$  à ne pas dépasser ?

Pour des raisons de simplicité, on négligera dans ce qui suit la tension aux bornes de la résistance  $R$  par rapport aux autres tensions du circuit et on supposera que le courant dans le moteur ne s'annule jamais.

**Question 7.4.** *Pour un rapport cyclique de 75 %, tracer l'allure de la tension instantanée aux bornes du moteur  $u_m$  et celle du courant parcourant son induit  $i_m$ .*

**Question 7.5.** *Déterminer l'expression de la fém  $E$  du moteur en fonction de  $\alpha$  et  $U_0$ .*

**Question 7.6.** *Déterminer l'expression littérale de l'ondulation crête à crête du courant  $i_m$ , notée  $\Delta I$ , en fonction de  $\alpha$ ,  $U_0$ ,  $f_h$  et  $L$ . Préciser la valeur de  $\alpha$  pour laquelle cette ondulation est maximale en donnant son amplitude, notée  $\Delta I_0$ , en fonction de  $U_0$ ,  $f_h$  et  $L$ .*

**Question 7.7.** *En déduire la fréquence minimale de fonctionnement du hacheur  $f_{\min}$  permettant de rendre cette ondulation inférieure à 5 % du courant nominal.*

**Question 7.8.** *Déterminer la valeur nominale  $\alpha_n$  du rapport cyclique permettant d'alimenter le moteur à sa tension nominale  $U_m = U_n$  en supposant que le courant  $i_m$  ne s'annule jamais. Donner la tension de commande  $u_{hn}$  correspondante, permettant de respecter le cahier des charges.*

### 7.1.3 Asservissement du courant moteur

Le courant circulant dans le moteur, noté  $i_m$ , est mesuré par un capteur délivrant une tension  $v_i = k_i i_m$  proportionnelle à ce courant avec  $k_i = 0,1 \text{ V} \cdot \text{A}^{-1}$ . Dans cette partie, on s'intéresse à des petites variations autour du point nominal défini par  $U_n$ ,  $I_n$ ,  $\alpha_n$  et  $u_{hn}$ , le moteur tournant à vitesse constante  $\Omega_n$ . Dans ces conditions, toutes les variables peuvent s'exprimer en fonction de leur valeur au point nominal et des variations autour de ce point, sous la forme :

- $i_m = I_n + \delta i$  pour le courant moteur ;
- $u_m = U_n + \delta u$  pour la tension moteur ;
- $u_h = u_{hn} + \delta u_h$  pour la tension de commande du hacheur.

Ainsi, il est possible d'utiliser les transformées de Laplace de ces variations, notées respectivement  $I_m(p)$ ,  $U_m(p)$  et  $U_h(p)$ , en supposant que le système se comporte comme un système linéaire pour ces variations.

**■ Dans cette partie, l'effet de la résistance  $R$  n'est pas négligé.**

**Question 7.9.** *À partir du schéma équivalent du moteur, déterminer la relation exprimant  $I_m(p)$  en fonction de  $U_m(p)$  en supposant la vitesse de rotation constante.*

**Question 7.10.** *Exprimer la valeur moyenne de la tension aux bornes du moteur en fonction des tensions  $u_h$ ,  $U_{hm}$  et  $U_0$ . En déduire la fonction de transfert  $H_m(p) = \frac{V_i(p)}{U_h(p)}$  définie comme le quotient de la transformée de Laplace des variations de la mesure du courant  $V_i(p)$  par la transformée de Laplace des variations de la grandeur de commande du hacheur  $U_h(p)$ .*

**Question 7.11.** *Déterminer le gain  $H_0$  et la constante de temps  $\tau_m$  de la fonction de transfert  $H_m(p)$ . Faire l'application numérique.*

Le courant moteur est asservi au moyen d'une boucle utilisant un correcteur en cascade de gain constant et réglable, noté  $C_i$ , comme indiqué sur le schéma-blocs de la figure 7.3.

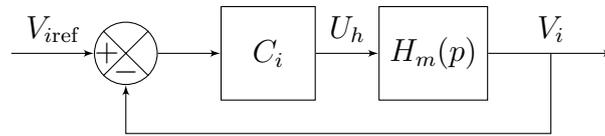


FIGURE 7.3 – Boucle de courant de l'asservissement du moteur.

Le signal d'entrée de cet asservissement est une tension de référence, notée  $V_{iref}(p)$ , image du courant souhaité dans le moteur, noté  $I_{ref}(p)$ , par la même relation que pour le capteur  $V_{iref}(p) = k_i I_{ref}(p)$ .

**Question 7.12.** Déterminer l'expression de la fonction de transfert en boucle fermée de cet asservissement en fonction de  $C_i$  et  $H_m(p)$ .

**Question 7.13.** Déterminer le gain  $H_{0BF}$  et la constante de temps  $\tau_{mBF}$  du système bouclé.

**Question 7.14.** En déduire la valeur numérique  $C_{i0}$  du gain  $C_i$  permettant, en boucle fermée, une bande passante à  $-3$  dB donnée par  $\Delta f_{BF} = 120$  Hz.

**Question 7.15.** Déterminer pour cette valeur de gain  $C_{i0}$ , l'erreur relative  $\epsilon_{i0}$  commise sur le courant. Conclure sur l'erreur obtenue en respectant le cahier des charges.

## 7.2 Capteur de position du galet

La position verticale du galet doit être mesurée avec précision afin de pouvoir en réaliser l'asservissement sur la position  $x(t)$  qui permet d'assurer une tension du film constante lors de son enroulement. Le capteur utilisé, situé sur le sol, utilise une émission d'ultrasons verticalement, à l'aplomb du galet, la réception de ces ultrasons étant obtenue au même point. On n'étudiera pas le mécanisme d'émission ou de réception, mais on suppose que pour toute impulsion, le récepteur délivre une impulsion d'amplitude constante mais décalée dans le temps suivant la loi  $\Delta t = \lambda_0 x$  avec  $\lambda_0$  une constante.

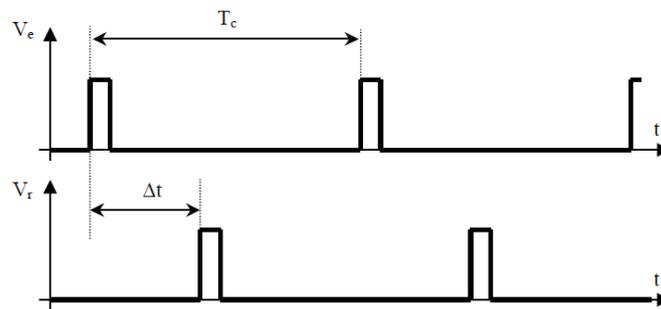


FIGURE 7.4 – Allure des signaux en émission et réception.

Les durées des impulsions  $V_e$  et  $V_r$  sont supposées très faibles devant la période d'horloge  $T_h$ . Les signaux logiques ainsi définis servent à piloter un système numérique constitué

d'un compteur et d'un registre parallèle 5 bits, qui code la position du galet sous forme numérique. Le mot numérique de sortie sera représenté sous la forme  $S = [S_4 S_3 S_2 S_1 S_0]$ , sa conversion en nombre entier étant appelée  $SN$ .

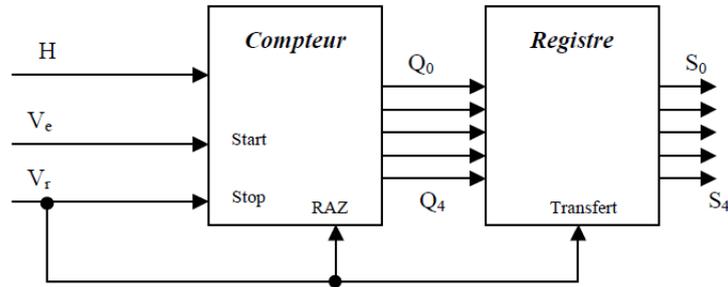


FIGURE 7.5 – Système de codage.

Une conversion numérique/analogique est alors nécessaire pour pouvoir mesurer  $x(t)$  et agir, de manière analogique sur le hacheur précédemment étudié. La conversion est réalisée au moyen d'un réseau « en échelle » représenté sur la figure 7.6 où tous les résistors ont la même résistance  $R_0 = 10 \text{ k}\Omega$ .

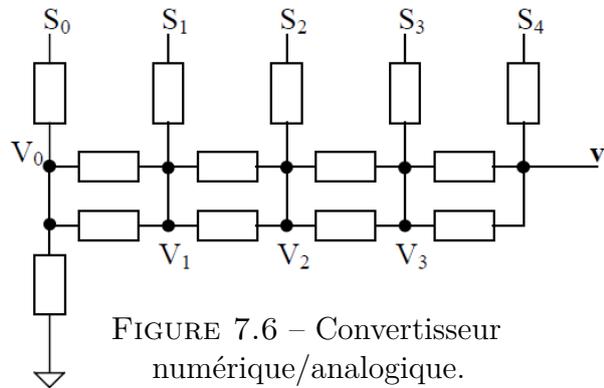


FIGURE 7.6 – Convertisseur numérique/analogique.

**Question 7.16.** En utilisant les potentiels  $V_0$  à  $V_3$ , déterminer un système de 5 équations permettant d'exprimer les tensions  $S_0$  à  $S_4$  en fonction des tensions  $V_0$  à  $V_3$  et  $v$ .

**Question 7.17.** En déduire l'expression de la tension  $v$  en fonction des tensions  $S_0$  à  $S_4$  en éliminant dans le système précédent les tensions  $V_0$  à  $V_3$ . Pour faire ce calcul de façon simple, il est conseillé de multiplier chaque équation par un nombre entier à déterminer puis d'en faire la somme.

Le montage précédent est associé à un amplificateur opérationnel parfait (figure 7.7). On donne la fonction de transfert de ce montage :

$$G_x(p) = \frac{V_x(p)}{V(p)} = \frac{R_1 + R_2 + R_1 R_2 C_1 p}{R_2 + R_1 R_2 C_1 p}$$

**Question 7.18.** Montrer qu'en régime établi, c'est-à-dire avec  $x$  constant, cette tension  $v_x(t)$  est proportionnelle à  $x$  suivant une loi du type  $v_x(t) = k_x x(t)$ . Déterminer l'expression du coefficient  $k_x$  en fonction de  $\lambda_0$ ,  $T_h$ ,  $R_1$  et  $R_2$ .

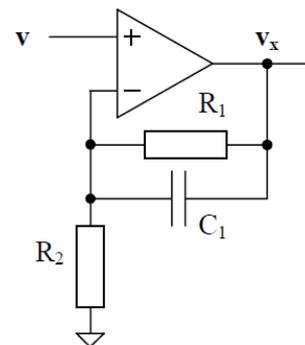


FIGURE 7.7 – Amplification du signal  $v$ .

## Laveuse autoportée

### Objectifs

Étudier la commande des moteurs d'une laveuse autoportée et dimensionner un filtre de la chaîne d'acquisition de la vitesse des roues.

La société Nilfisk propose une large gamme d'engins de nettoyage des sols. Celle des laveuses autoportées répond aux besoins de lavage pour des surfaces de plusieurs milliers de km carrés. C'est par exemple le cas des sols de super et hyper-marché. Les qualités de ces machines résident dans leur sécurité d'usage, leur faible nuisance sur l'environnement, leur autonomie et leur maniabilité. Cette maniabilité impose des encombrements minimisés en largeur et des rayons de giration très faibles.

Le modèle étudié dans ce sujet est la laveuse BR 752 dont la structure du châssis à trois roues est privilégiée pour autoriser des rayons de giration très petits. Sur la gamme actuelle, la motorisation est assurée par la roue avant avec une machine à courant continu.

#### Extrait du cahier des charges

La vitesse de la laveuse peut varier de  $-2$  km/h à  $6$  km/h et on souhaite que la plus petite variation mesurable soit inférieure à  $0,3$  km/h.



### 8.1 Étude de la commande des moteurs

En fonction de la position de la pédale et des mesures de vitesse réalisées par la génératrice tachymétrique, la carte de commande élabore une commande de vitesse qu'elle transmet ensuite à l'interface de puissance dont une représentation simplifiée est donnée à la figure 8.1. La tension  $U_0 = 24$  V est supposée constante et les interrupteurs parfaits.

Les signaux  $T$ -périodiques, de fréquence  $f = 1/T = 20$  kHz, produits par la carte de commande gèrent les interrupteurs T1, T2, T3 et T4 tels que (T1–T4) d'une part et (T2–T3) d'autre part sont commandés simultanément à la fermeture et à l'ouverture :

- pour  $t$  compris entre  $0$  et  $\alpha T$ , T1–T4 sont fermés et T2–T3 sont ouverts ;
- pour  $t$  compris entre  $\alpha T$  et  $T$ , T2–T3 sont fermés et T1–T4 sont ouverts.

**Question 8.1.** Déterminer les possibilités de réversibilité en courant et en tension du convertisseur alimentant le moteur. Justifier la réponse.

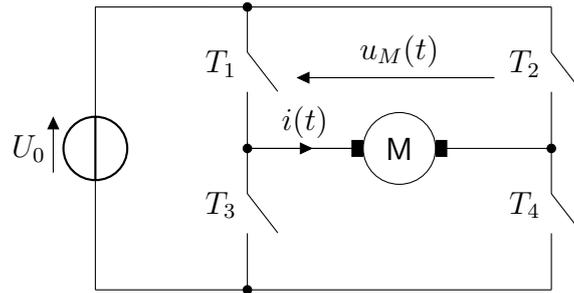


FIGURE 8.1 – Structure du convertisseur statique.

**Question 8.2.** Représenter le chronogramme sur deux périodes de la tension  $u_M$  pour un rapport cyclique de 0,25.

**Question 8.3.** Exprimer  $\langle u_M \rangle$  la valeur moyenne de la tension  $u_M$  aux bornes de l'induit de la MCC en fonction de la tension  $U_0$  et du rapport cyclique  $\alpha$ . À partir de cette relation, proposer un encadrement du rapport cyclique dans le cas où la vitesse de rotation du moteur est positive ( $\Omega > 0$ ) et dans le cas où elle est négative ( $\Omega < 0$ ).

On suppose que la laveuse roule à 6 km/h pour  $\alpha = 1$  et à 3 km/h si  $\alpha = 0,75$ . On suppose de plus que le rapport cyclique est codé sur un octet et on donne le code suivant :

```
def RpportCyclique(vitesse):
    return(255*(vitesse+6)//12)
```

**Question 8.4.** Vérifier que ce code permette de vérifier le cahier des charges en générant le rapport cyclique attendu.

## 8.2 Étude de la chaîne d'acquisition de la vitesse de rotation des roues de la laveuse

Une mesure faussée de la vitesse de rotation des roues de la laveuse pourrait engendrer un mauvais comportement de celle-ci lors de la conduite (glissement, dérapage...). Il est donc important de s'assurer que la mesure de la vitesse est correctement réalisée.. Cette mesure est faite par une génératrice tachymétrique qui est installée sur l'essieu reliant les roues arrière. La tension issue du capteur  $V_E(t)$  est perturbée par des parasites générés par le passage des balais d'une lame de cuivre à l'autre sur le collecteur de la génératrice. Un filtre pouvant atténuer ces perturbations est donc installé en aval du capteur de vitesse. Le schéma simplifié de la chaîne d'acquisition est donné sur la figure 8.2.

Les objectifs de cette partie sont :

- rechercher la fréquence de coupure du filtre à installer ;
- vérifier les performances du filtre et de la conversion A/N.

Le collecteur de la génératrice possède 14 lames. Son arbre tourne à une vitesse maximale de 5 836 tr/min, ce qui correspond à une vitesse des roues de 6 km/h. On note  $f_0$  la fréquence de coupure du filtre en amont du CAN et  $f_P$  la fréquence fondamentale des parasites générés par le collecteur.

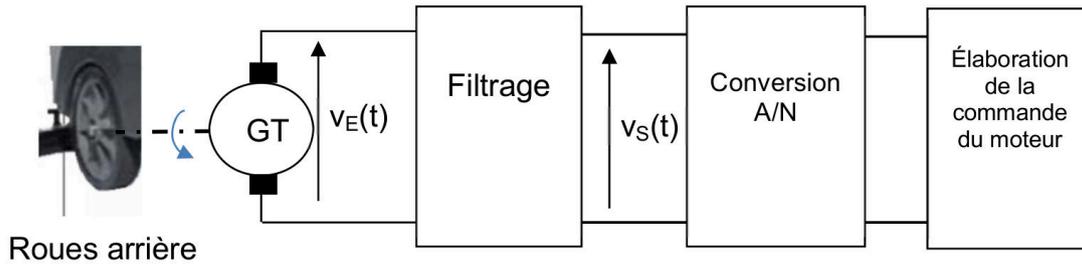


FIGURE 8.2 – Chaîne d’acquisition de la vitesse des roues.

**Question 8.5.** Déterminer  $f_p$ .

Les caractéristiques du filtre sont les suivantes :

- la fréquence  $f_0 = 0,1 f_p$  ;
- les signaux ayant une fréquence supérieure ou égale à  $f_p$  devront subir une atténuation strictement supérieure à 40 dB par rapport aux signaux basses fréquences.

**Question 8.6.** Dessiner un gabarit de filtre respectant ces contraintes.

La figure 8.3 est un exemple de structure de filtre proposée par le constructeur du capteur.

**Question 8.7.** Montrer que le filtre de la figure 8.3 ne peut pas satisfaire les exigences d’atténuation fixées.

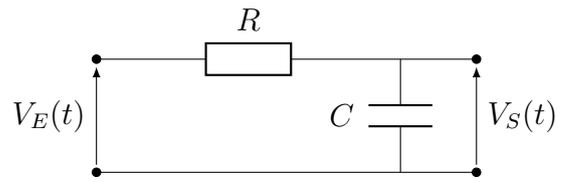


FIGURE 8.3 – Solution de filtrage n° 1.

On propose d’ajouter un deuxième filtre en cascade identique au premier.

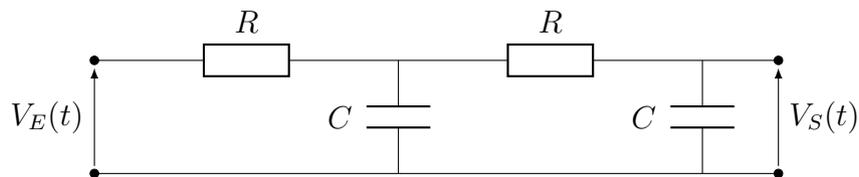


FIGURE 8.4 – Deuxième solution de filtrage.

**Question 8.8.** Déterminer la fonction de transfert  $\frac{V_S(p)}{V_E(p)}$  et montrer que le filtre peut convenir pour satisfaire les exigences d’atténuation fixées.

**Question 8.9.** Déterminer un couple de valeurs pour  $R$  et  $C$  de façon à satisfaire le gabarit défini précédemment.

**Question 8.10.** Calculer la plus petite variation de vitesse au niveau des roues qui peut être mesurée sachant que la mesure faite par la génératrice tachymétrique est convertie en un mot de 5 bits. Conclure quant au respect du cahier des charges au regard de la précision de cette mesure.

## Direction automobile découplée

---

### Objectif

---

étude du variateur associé au moteur à courant continu afin de valider la motorisation de l'unité de braquage.

---

Depuis maintenant de nombreuses années, les commandes de vol d'avions sont passées d'une technologie purement mécanique à la technologie par fil (Fly by Wire). Le secteur automobile suit cette tendance qui présente de nombreux avantages. On trouve ainsi, le Throttle by Wire (accélérateur), le Clutch by Wire (embrayage), le Brake by Wire (freins) et le Steer by Wire (direction). C'est le système de direction par fil (Steer by Wire), encore nommé direction découplée, qui fait l'objet de l'étude proposée.

Actuellement la législation ne permet pas de mettre totalement en œuvre cette technologie et exige qu'une liaison mécanique reste présente sur le système de direction entre le volant et le boîtier de direction. Elle représente cependant la prochaine étape du développement des systèmes de direction, suite, notamment, à l'essor de la conduite automatisée. Cette technologie offre des fonctionnalités nouvelles, comme :

- de simplifier la conception de l'habitacle et permettre un montage indifférent pour une conduite à droite ou à gauche ;
- de libérer de la place dans le compartiment moteur ;
- de protéger le conducteur de la remontée de la colonne de direction en cas de choc frontal ;
- d'optimiser en temps réel la vivacité et le retour de la direction, ainsi que son rapport de démultiplication ;
- d'éviter la remontée de vibrations dans le volant, quel que soit l'état de la chaussée sur laquelle l'automobile évolue.

En 2013, Infiniti, filiale de Nissan, équipe en série, l'Infiniti Q50 (figure 1) d'une direction découplée paramétrable par le conducteur selon quatre modes, mais conserve, pour respecter la législation, une liaison mécanique débrayée en mode normal et embrayée en cas de panne, malgré une forte redondance du système.



Figure 1 – Steer by Wire  
Infiniti Q50  
© Infiniti



Le principe de la direction découplée est de substituer à la liaison mécanique entre le volant et les roues, une architecture de type télémanipulateur à un degré de liberté qui consiste à coupler un robot maître, manipulé par un opérateur, avec un robot esclave, distant, qui effectue la tâche. Cette structure peut être schématisée par l'organisation qui suit (figure 9.1).

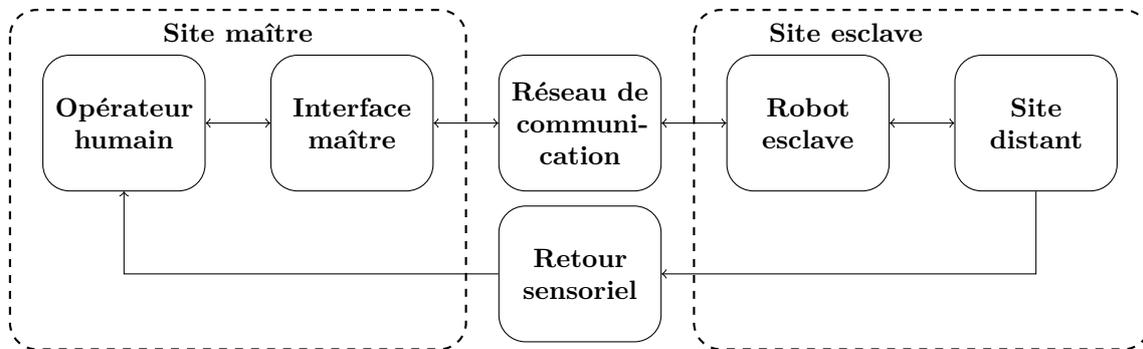


FIGURE 9.1 – Architecture maître esclave

Dans le cas de la direction découplée, le site maître est l'habitacle du véhicule et le site distant le véhicule même. L'interface maître est l'unité de pilotage à retour d'effort, constituée du volant équipé d'un actionneur qui génère le retour d'effort (couple de direction), indispensable à la restitution d'une sensation de conduite usuelle au conducteur. Le robot esclave est l'unité de braquage des roues constitué d'un moteur à courant continu monté sur le boîtier de direction commandant la crémaillère qui oriente les roues par l'intermédiaire des biellettes de direction et du train avant. La figure 9.2 décrit l'organisation générale sur un véhicule, d'une direction découplée tout électrique.

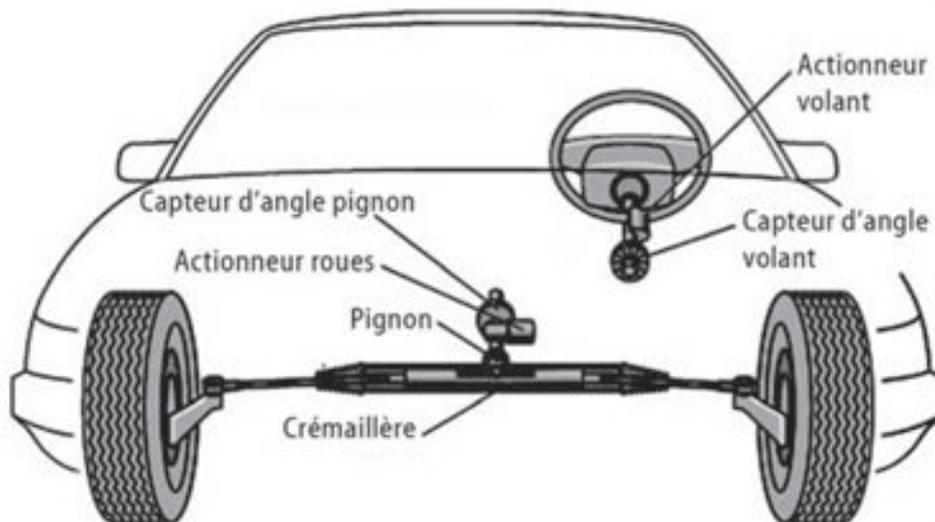
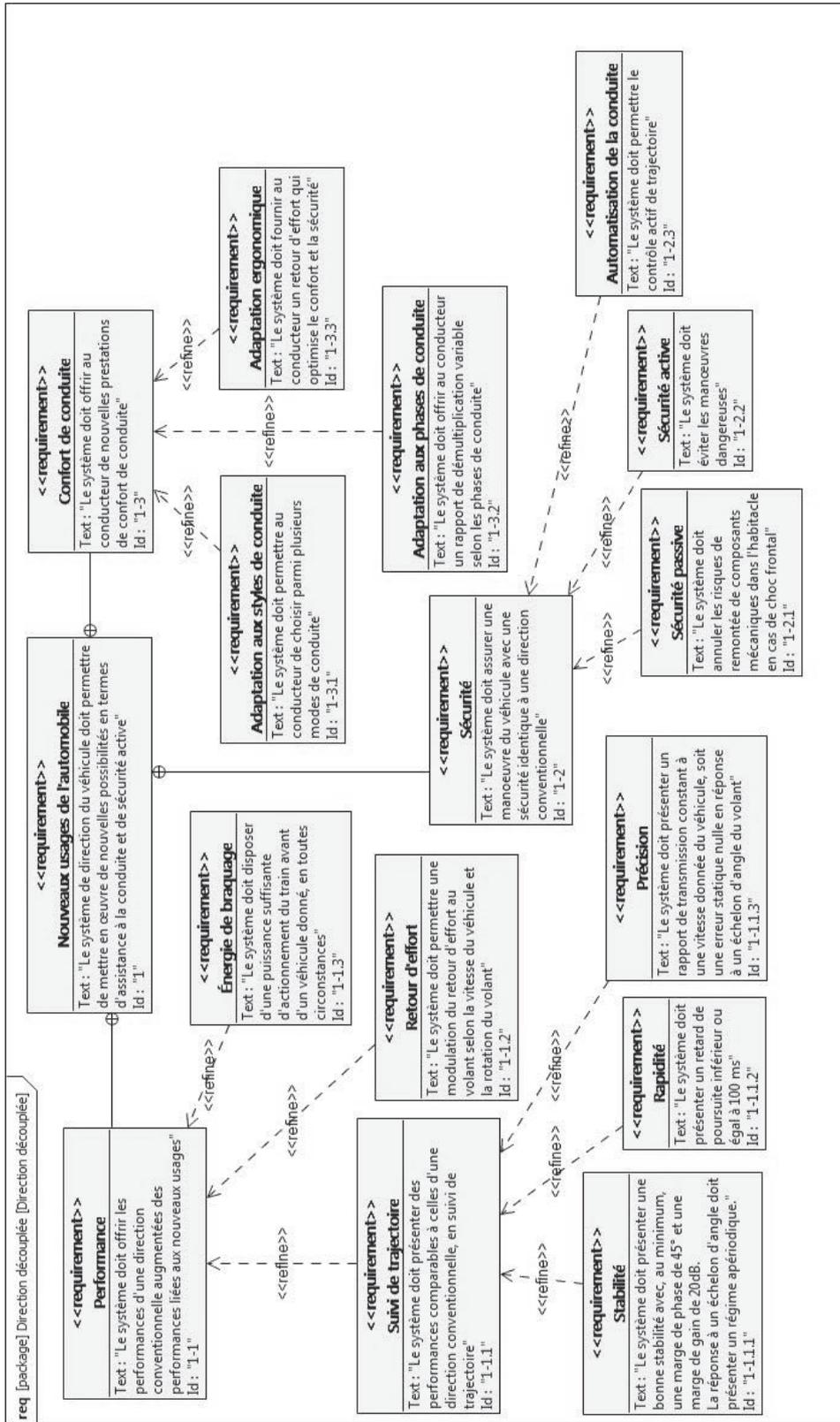


FIGURE 9.2 – Principe de la direction découplée

# Cahier des charges



La situation la plus exigeante pour la motorisation de l'unité de braquage est celle de la réalisation d'un créneau par le conducteur pour se mettre en position de stationnement. En effet le braquage des roues à l'arrêt induit des valeurs d'actions mécaniques du sol sur les roues plus importantes que pour les autres situations de conduite. Les critères du cahier des charges conduisent la machine à courant continu à devoir fournir, pendant le braquage, les valeurs numériques suivantes :

- couple moyen  $C_{mb\_avg} = 1,25 \text{ N}\cdot\text{m}$  ;
- vitesse de rotation moyenne  $\Omega_{MCC\_avg} = 480 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Le point de fonctionnement en valeur moyenne est défini par  $(V_{MCC\_avg}, I_{MCC\_avg})$ .

### Données pour la motorisation

- Machine à courant continu
  - tension nominale  $V_n=12 \text{ VDC}$  ;
  - courant nominal  $I_n=150 \text{ A}$  ;
  - inductance d'induit  $L=500 \mu\text{H}$  ;
  - résistance d'induit  $R_{induit}=15 \text{ m}\Omega$  ;
  - constantes de couplage électromécanique  $k_t=0,01 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{A}$  ou  $k_t=0,01 \text{ V}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1}$ .
- Variateur
  - calibre variateur  $I_v=150 \text{ A}$  ;
  - tension d'alimentation  $V_{vmax}=20 \text{ VDC}$  ;
  - résistance drain/source à l'état passant des MOSFET  $R_{DSON}=7,5 \text{ m}\Omega$  (à l'état passant le MOSFET se comporte comme une résistance) ;
  - tension à l'état passant des diodes  $V_D=0,7 \text{ V}$
  - fréquence de découpage  $f=10 \text{ kHz}$ .
- Batterie
  - 12 VDC / 600 A (tension à vide/courant de court-circuit) ;
  - 70 Ah ;
  - résistance interne  $R_{bat\_int} = 20 \text{ m}\Omega$

Critère	Niveau
Effort $F_{mc}$ maximal fourni par la crémaillère	2500 N mini
Vitesse moyenne $V_{c\_avg}$ de déplacement de la crémaillère	$0,24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Amplitude de l'ondulation de l'effort fourni par la crémaillère	25 N maxi

## 9.1 Validation du point de fonctionnement de la valeur moyenne

**Question 9.1.** *Exprimer la valeur moyenne du courant du moteur à courant continu  $I_{MCC\_avg}$  puis donner sa valeur numérique.*

Le variateur est construit à partir d'un pont en H à base d'interrupteurs à technologie MOSFET.

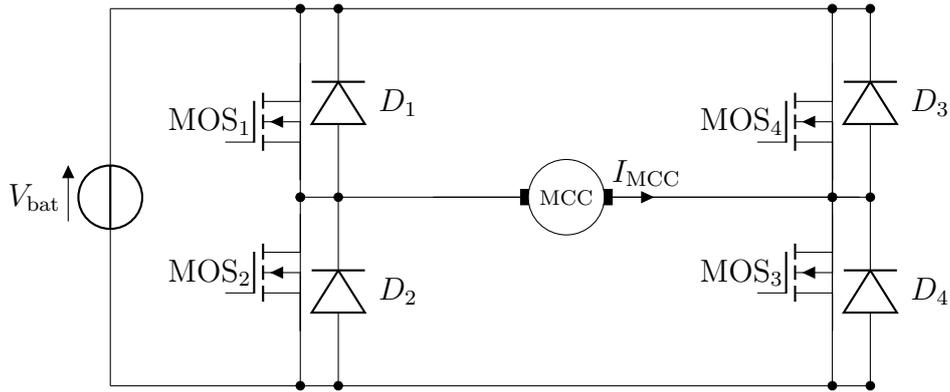


FIGURE 9.3 – Variateur

La stratégie de commande est la suivante sur une période de découpage  $T$ , avec le rapport cyclique  $\alpha \in [0, 1]$  :

- MOS<sub>1</sub> et MOS<sub>4</sub> commandés sur  $[0, \alpha T]$  ;
- MOS<sub>2</sub> et MOS<sub>3</sub> commandés sur  $[\alpha T, T]$ .

**Question 9.2.** Déterminer la valeur numérique de  $\alpha$  qui permet à la structure de faire circuler dans la MCC, la valeur maximale du courant  $I_{MCC_{max}}$ .

**Question 9.3.** Calculer numériquement la valeur de  $I_{MCC_{max}}$ , pour cette valeur de  $\alpha$  et pour la vitesse de rotation moyenne  $\Omega_{MCC_{avg}} = 480 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ .

**Question 9.4.** En déduire si l'équipement constitué de la batterie, du variateur et de la MCC est compatible avec les critères du cahier des charges.

## 9.2 Validation de l'exigence d'ondulation de couple

Dans cette partie, afin de simplifier l'analyse, on néglige les différentes résistances ( $R_{bat\_int}$ ,  $R_{DSON}$  et  $R_{induit}$ ) intervenant dans le montage. Le modèle de la machine à courant continu se réduit à une fem  $E_{MCC}$ , une résistance d'induit  $R$  et une inductance d'induit  $L$ . Le montage se simplifie selon la figure 9.4.

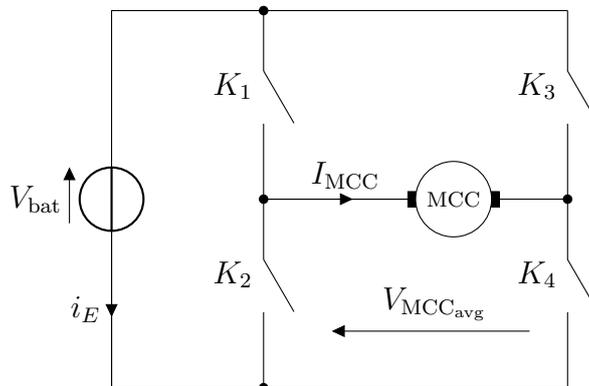


FIGURE 9.4 – Modèle simplifié du variateur.

La stratégie de commande des quatre interrupteurs  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  et  $K_4$  considérés comme parfaits est la suivante sur une période de découpage  $T$ , avec le rapport cyclique  $\alpha \in [0, 1]$  :

- $K_1$  et  $K_4$  passant sur  $\alpha \in [0, \alpha T]$  ;
- $K_2$  et  $K_3$  passant sur  $\alpha \in [\alpha T, T]$ .

De plus, on considère que  $I_{MCC}$  reste toujours du même signe pour une valeur de  $\alpha$  fixe.

**Question 9.5.** *Quel est le type de commande associé à ce hacheur 4 quadrants.*

**Question 9.6.** *Donner l'expression de  $V_{MCC_{avg}}(t)$  pour  $\alpha \in [0, \alpha T]$  et  $\alpha \in [\alpha T, T]$ . En déduire l'expression de  $I_{MCC}(t)$  pour  $\alpha \in [0, \alpha T]$  et  $\alpha \in [\alpha T, T]$ .*

**Question 9.7.** *Tracer l'évolution de  $V_{MCC_{avg}}(t)$  et de  $I_{MCC}(t)$  en fonction du temps pour  $\alpha = 0, 75$ .*

**Question 9.8.** *Donner la valeur moyenne de la tension  $V_{MCC_{avg}}$  aux bornes de la MCC en fonction de  $V_{bat}$  et  $\alpha$ .*

**Question 9.9.** *Écrire la relation littérale donnant l'amplitude de l'ondulation de courant  $\Delta I_{MCC}$  en fonction de  $V_{bat}$ ,  $\alpha$ ,  $L$  et  $f$  (la fréquence associée à la période  $T$ ).*

**Question 9.10.** *Tracé l'évolution de  $\Delta I_{MCC}$  en fonction de  $\alpha$ . En déduire la valeur de  $\alpha$  générant l'ondulation maximale du courant  $I_{MCC}$ .*

**Question 9.11.** *Exprimer l'amplitude de l'oscillation d'effort  $\Delta F_{mc}$  sur la crémaillère puis déterminer numériquement son maximum  $\Delta F_{mc_{max}}$ . Les caractéristiques du moteur à courant continu et du variateur choisis permettent-elles de valider le critère du cahier des charges ?*

## Étude d'une chaîne de recuit continu de tôles en Nickel

### Objectifs

On cherche à dimensionner le variateur qui, associé au moteur, permet de satisfaire l'exigence de *maintenir une tension constante de la tôle dans l'accumulateur d'entrée*.

Le support de cette étude est une installation industrielle de recuit mise en place par l'entreprise MSXCLAL. La fonction globale de cette installation est d'effectuer un traitement thermique de recuit sur une tôle se déroulant en continu à l'intérieur d'un four (chauffage par résistances sous atmosphère protectrice). La chaîne de traitement permet un déroulement continu, majoritairement dans le plan horizontal, de la tôle guidée par des rouleaux dont certains sont moteurs : les rouleaux tracteurs.

### 10.1 Étude du variateur du moteur de l'accumulateur

Le moteur de l'accumulateur d'entrée est un moteur à courant continu à flux constant. Une étude précédente a permis de déterminer que la valeur du couple moteur à prendre en compte pour le dimensionnement du variateur est le couple nominal égal à  $5,25 \text{ N}\cdot\text{m}$ . Le schéma du variateur étudié est donné figure 10.1.

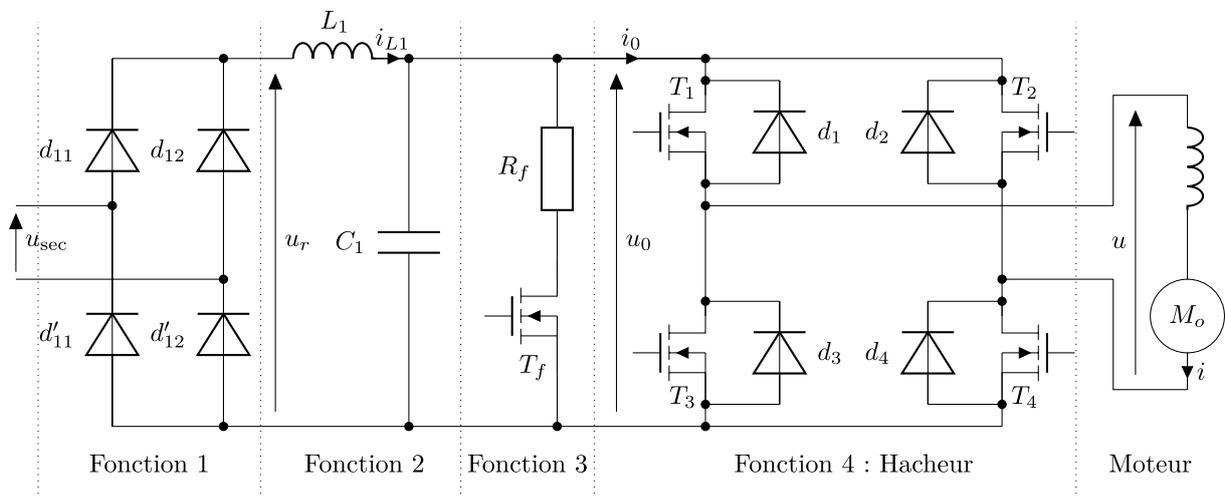


FIGURE 10.1 – Schéma du variateur étudié.

**Question 10.1.** Calculer le courant d'induit nominal du moteur pour une valeur de constante de couple de  $0,95 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$ . Quel est le type de réversibilité que doit assurer le variateur l'alimentant (réversibilité en courant ? en tension ? en courant et en tension ?). Justifier votre réponse.

Le variateur utilisé a la structure donnée figure 10.1. La tension  $u_0$  est, dans un premier temps, supposée constante et notée  $U_0$ .

**Question 10.2.** Identifier les fonctions 1 à 3 et décrire leurs rôles. Dans quelle phase de fonctionnement la fonction 3 sera utilisée ? Que se passerait-il si elle n'avait pas été implantée ?

### 10.1.1 Étude de la fonction 1

On se place dans une phase de montée du chariot. On suppose que le courant  $i_{L1}$  est toujours strictement positif et que les courants et tensions représentés sur la figure sont périodiques ou continus. La fonction 3 est inactive.

**Question 10.3.** Justifier l'hypothèse « la fonction 3 est inactive ». Donner l'allure de la tension  $u_r(t)$  sur une période de la tension secteur  $u_{sec}(t) = U\sqrt{2}\sin(2\pi ft)$  où  $U = 230\text{ V}$  et  $f = 50\text{ Hz}$  et calculer la valeur moyenne  $\langle u_r \rangle$  de cette tension. Donner, en la justifiant, la valeur de la tension  $U_0$ .

### 10.1.2 Étude de la fonction 4

Des relevés de tension et de courant d'induit du moteur, lors de deux phases de fonctionnement à vitesse sensiblement constante ont été réalisés : l'un pendant la phase de descente du chariot, l'autre pendant la phase de montée.

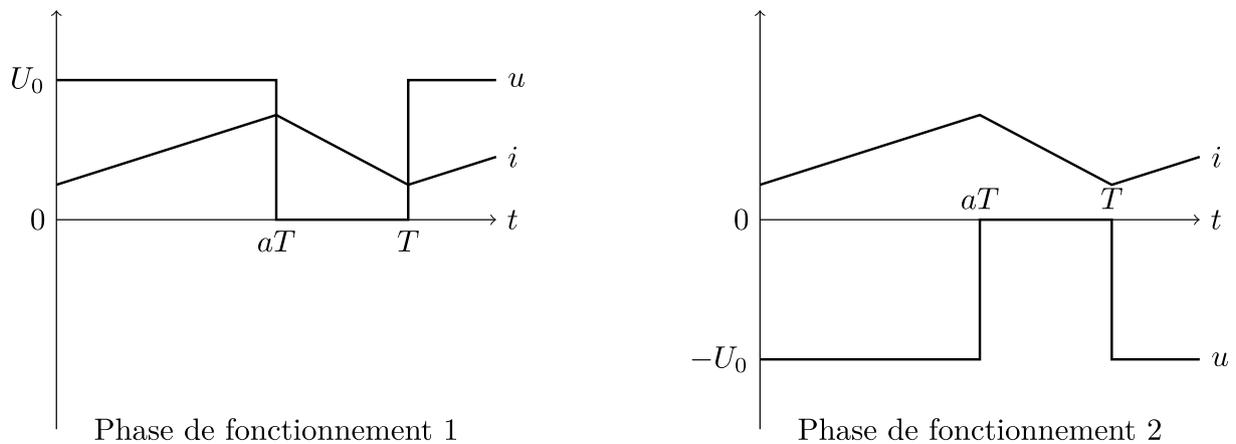


FIGURE 10.2 – Relevés de la tension et du courant induit.

**Question 10.4.** Identifier parmi les deux allures données figure 10.2 celle qui correspond à la descente et celle qui correspond à la montée. Justifier votre réponse.

Le transistor  $T_4$  est toujours commandé pendant une phase de fonctionnement 1 et  $T_3$  est toujours commandé pendant une phase de fonctionnement 2.

**Question 10.5.** Indiquer, pour une phase de fonctionnement 1 puis pour une phase de fonctionnement 2, le (ou les) transistor(s) commandé(s) entre 0 et  $aT$  puis entre  $aT$  et  $T$ , ainsi que les composants de puissance qui conduisent réellement.

**Question 10.6.** *Tous les composants conduisent-ils pendant au moins une phase de fonctionnement ? En cas de réponse négative, préciser les composants qui ne conduisent jamais. Le hacheur choisi correspond-il aux besoins de l'application ? Justifier son choix.*

### 10.1.3 Étude de la fonction 2

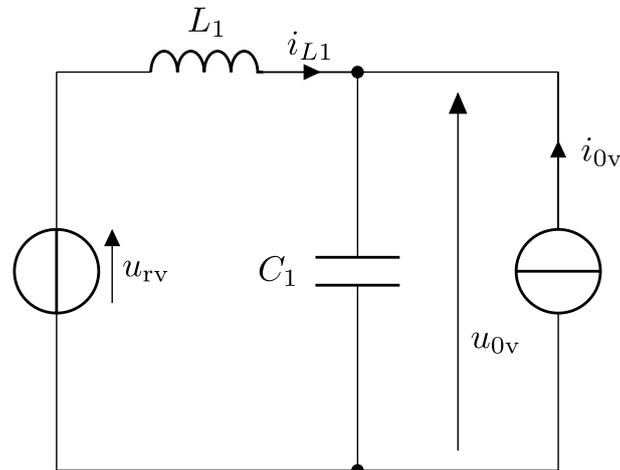


FIGURE 10.3 – Filtre assurant la fonction 2.

La fonction 2 est un filtrage de la tension  $u_r(t)$ . Son rôle est de fournir une tension quasiment continue  $u_0(t)$ , à partir de la tension  $u_r(t)$  précédemment étudiée. Le comportement du filtre en continu a été vu dans la question précédente où la tension  $U_0$  a été établie. On s'intéresse maintenant uniquement au comportement du filtre  $L, C$  vis-à-vis :

- de la variation  $u_{rv}(t)$  de la tension  $u_r(t)$  de fréquence  $f_1 = 100$  Hz ;
- de la variation  $i_{0v}(t)$  du courant  $i_0(t)$ , de fréquence  $f_2 = 16$  Hz.

Ces variations seront supposées sinusoïdales. Pour que le filtre soit correctement dimensionné, il faut que les variations de ces grandeurs induisent des variations  $u_{0v}(t)$  de  $u_0(t)$  faibles. On admettra que le filtre est correctement dimensionné si la valeur efficace  $U_{0v}$  de la variation  $u_{0v}(t)$  de  $u_0(t)$  occasionnée soit par la variation  $u_{rv}(t)$  de la tension  $u_r(t)$ , soit par la variation  $i_{0v}(t)$  du courant  $i_0(t)$  est inférieure à 3 V. Par rapport aux variations, le système est modélisé comme indiqué figure 10.3.

**Question 10.7.** *Le développement en série de Fourier de  $u_{rv}(t)$  montre que la valeur efficace  $U_{rv}$  de  $u_{rv}(t)$  est égale à 100 V. En supposant la variation de courant nulle ( $i_{0v}(t) = 0$ ), déterminer la condition sur le produit  $LC$  pour que le filtre réponde au cahier des charges. On donne  $L_1 = 100$  mH, en déduire la valeur de  $C$  à choisir.*

**Question 10.8.** *On suppose maintenant nulle la variation  $u_{rv}(t)$ . La valeur efficace maximale de  $i_{0v}(t)$  est  $I_{0v} = 6$  A. Déterminer la valeur efficace  $U_{0v}$  de la variation  $u_{0v}(t)$  de la tension de sortie du filtre. La valeur de la capacité du condensateur choisi dans la question précédente répond-elle au cahier des charges ?*

